

Este trabajo está bajo licencia [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)© 2 por C

Universidad Nacional
de Córdoba

Facultad de Ciencias Químicas

Doctorado en Ciencias Químicas

Tesis Doctoral Cooperativa

**Efecto de la molienda seca de granos de
sorgo sobre las propiedades fisicoquímicas
y tecnológicas de las harinas**



Mg. María Isabel Curti

Dr. Pablo Daniel Ribotta

Director por la Universidad Nacional de Córdoba

Dra. Marianela Savio

Directora por la Universidad Nacional de La Pampa

Córdoba, marzo de 2023

El presente trabajo de Tesis para optar al título de Doctora en Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Córdoba fue realizado en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos Córdoba (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional de Córdoba) y en el Instituto de Ciencias de la Tierra y Ambientales de La Pampa (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de La Pampa), bajo la dirección del Dr. Pablo Daniel Ribotta y la Dra. Marianela Savio.

Tribunal de tesis

Dra. María Verónica Baroni

Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Químicas

Dra. Silvia Kivatinitz

Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Químicas

Dra. Valeria Pfaffen

Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Químicas

Dra. Marina de Escalada Pla

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

AGRADECIMIENTOS

La realización de la presente Tesis no habría sido posible sin la valiosa ayuda de cada una de las personas que participaron, tanto desde lo profesional como lo personal, en las diferentes etapas de este trabajo.

En primer lugar, quiero agradecer al Dr. Pablo Ribotta por confiar nuevamente en mí y alentarme a continuar con mi formación. Por acompañarme en cada etapa, transmitirme sus conocimientos y experiencia, y especialmente por su comprensión en los momentos difíciles.

A la Dra. Marianela Savio por aceptar la codirección de este trabajo, brindarme todo su apoyo y poner a mi alcance todas las herramientas necesarias para llevarlo a cabo. Al Dr. José Manuel Camiña por abrirme las puertas de su grupo de investigación, y permitirme comenzar un nuevo camino, cuando todo era incierto. A la Dra. Silvana Azcarate que fue la primera persona que conocí en mi regreso a La Pampa y que no dudó en guiarme para llegar a formar parte de este grupo y siempre tuvo la mejor predisposición para aportar a mi trabajo.

Al Dr. Manuel Gómez, por recibirme cálidamente en España y ofrecerme la oportunidad de realizar una estancia en su grupo de investigación de excelencia.

A todos los y las integrantes del Laboratorio de Química Biológica, Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNC), donde realicé la mayor parte experimental de este trabajo, por siempre estar dispuestos a cooperar y facilitarme lo que fuera necesario. Especialmente a la Ing. Fernanda Quiroga que, en cada uno de mis días en Córdoba, se preocupó por hacer más fácil mi estadía y tuvo la mejor predisposición para ayudarme a organizar las actividades experimentales.

A mis compañeros de la facultad de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa, por hacerme sentir bienvenida dentro del nuevo grupo de trabajo y brindarme todo su apoyo.

A la Dra. Marcela Martínez por su dedicación, excelente predisposición y valiosos conocimientos.

Al sistema educativo público y en especial a la Universidad Nacional de Córdoba por otorgarme una educación de excelencia y darme la posibilidad de alcanzar el máximo título de formación académica.

A CONICET por otorgarme la beca doctoral que me permitió dedicar mi trabajo íntegramente a la elaboración de presente Tesis Doctoral.

A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa, por el apoyo económico para la realización de los numerosos viajes a Córdoba que fueron indispensables para llevar adelante el trabajo. También por otorgarme la flexibilidad necesaria en mis actividades docentes para poder culminar esta tesis.

A la Secretaría de Ciencia Técnica de la UNC por el apoyo económico, a través de los subsidios a los proyectos de investigación, de los que estos resultados son parte.

A los y las integrantes del jurado de tesis, por aceptar la corrección de este trabajo y que, sin duda, sus críticas y consejos me han permitido culminarlo exitosamente.

Finalmente quiero agradecer a quienes me acompañaron y estimularon en este camino desde lo personal y son el pilar de mi vida; mi familia y amigos. Sin dudas la mención especial es para mi compañero Martín que desde el inicio confió en que podía lograrlo, brindándome su apoyo y cariño de manera incondicional.

A todos y todas, sinceramente... ¡¡Muchas gracias!!

*A la memoria de mis padres Irma y Francisco,
A mi compañero Martín*

RESUMEN

El grano de sorgo, tradicionalmente destinado a la alimentación animal, también presenta buenas características agronómicas y nutricionales para impulsar su utilización en el consumo humano. Además, la ausencia de gluten en su composición permite su empleo para la elaboración de productos horneados aptos para personas con celiaquía. Por ello, las características de las harinas de sorgo revisten especial importancia en la calidad de sus productos derivados.

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto del tipo de molienda sobre las características químicas, funcionales y tecnológicas de las harinas de sorgo, y su relación con la calidad de los productos horneados. En primer lugar, se realizó el acondicionamiento, pulido y molienda de los granos de sorgo (blanco, rojo y marrón) bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad. Como primer resultado se observó que el aumento en el tiempo de pulido disminuyó el rendimiento de molienda y el contenido de cenizas de las harinas molidas por impacto. Un efecto similar se produjo al aumentar el contenido de humedad en las harinas producidas por molienda de rodillos. Estos parámetros de proceso también afectaron el color y los perfiles de viscosidad de las harinas. Por otra parte, la población de partículas de las harinas obtenidas por ambas moliendas presentó una distribución bimodal en las variedades de sorgo evaluadas.

Posteriormente se analizó la vida útil de las harinas y se demostró que los indicadores microbiológicos se encontraban dentro del límite del Código Alimentario Argentino (CAA), tanto al inicio, como al final del ensayo de almacenamiento, con la excepción de los coliformes totales, que solo lo hicieron al disminuir su recuento luego de 150 días (final del ensayo). Dentro de los parámetros fisicoquímicos analizados, la acidez total titulable y los productos de oxidación secundarios obtenidos en el ensayo de oxidación acelerada de todas las harinas, aumentaron entre el inicio y el transcurso del ensayo, sin importar el tipo de molienda. Sin embargo, el índice de peróxidos se encontró debajo del límite establecido por el CAA para todas las muestras durante el tiempo de almacenamiento.

A continuación, se elaboraron bizcochuelos con harinas de sorgo blanco y marrón utilizando: por un lado, las harinas obtenidas en la etapa anterior con mayor rendimiento de molienda, menor

contenido de cenizas y menor tamaño de partículas; y por otro, nuevas harinas de aún menor tamaño de partículas que las anteriores, obtenidas mediante molienda ciclónica y tamización. Los perfiles de viscosidad de las harinas aumentaron a mediada que el tamaño de las partículas se redujo. Los batidos producidos con harinas de menor tamaño de partículas presentaron mayor densidad y viscosidad, con burbujas de aire más pequeñas y una distribución de tamaño más homogénea. Además, las harinas con menor tamaño de partícula condujeron a bizcochuelos de mayor volumen y menor firmeza, independientemente de la variedad de sorgo utilizada.

Seguidamente, se elaboraron galletitas obtenidas a partir de harinas de sorgo blanco y marrón (granos integrales y pulidos, con posterior molienda por impacto) y sus mezclas con harina de arroz. Las masas obtenidas presentaron un comportamiento viscoelástico tipo sólido. Las galletitas formuladas con harina de sorgo blanco integral y su mezcla con arroz exhibieron la mayor dureza y obtuvieron las mejores puntuaciones en el ensayo de evaluación sensorial.

Finalmente, se elaboraron panes con harinas de sorgo blanco de tres tipos: integral obtenida por molienda de impacto, y parcialmente refinadas producidas por pulido y molienda de impacto y por rodillos con posterior tamizado. Los panes elaborados con harina obtenida por pulido y molienda de impacto presentaron una distribución de alveolos de mayor tamaño y menor dureza de la miga, sin evidencia de colapso en la estructura. La determinación de los compuestos fenólicos indicó que éstos estuvieron presentes en las harinas y disminuyeron en los panes, al igual que su capacidad antioxidante, siendo la harina integral y los respectivos panes los que presentaron mayores valores. En el ensayo de digestibilidad *in vitro*, se observó una disminución del contenido de polifenoles totales y su actividad antioxidante durante todas las fases de la digestión, excepto durante la etapa intestinal donde la actividad antirradicalaria aumentó. También el contenido de minerales (Cu, Fe, Mn y Zn) disminuyó durante las etapas de digestión *in vitro*. Se encontró un aporte superior de estos minerales a la dosis diaria recomendadas (DDR), a partir de una porción de pan elaborado con harina integral. Sin embargo, su biodisponibilidad se vio reducida en presencia de la mayor cantidad de salvado.

Estos resultados aportan información respecto a la obtención y las características de las harinas de sorgo y su utilización en productos destinados a la alimentación humana. De esta manera, este trabajo contribuye a agregar valor a la cadena de producción, mejorar sus condiciones de comercialización y aumentar la variedad de alimentos libres de gluten disponibles.

ABSTRACT

Sorghum grain, traditionally used for animal feed, also exhibits good agronomic and nutritional characteristics to promote its use for human consumption. In addition, the absence of gluten allows its utilization for the preparation of bake goods suitable for people with celiac disease. For this reason, the characteristics of sorghum flour are of special importance in the quality of the products.

In this context, the present work aimed to evaluate the effect of the type of milling on the chemical, functional and technological characteristics of sorghum flours, and its relationship with the quality of bake goods. First, the sorghum grains (white, red, and brown) were conditioned, polished, and milled under different conditions. As a first result, an increase in polishing time decreased the milling performance and the ash content of the flours milled by impact. Increasing the moisture content in flours produced by roller milling generated a similar effect. These parameters also affected the color and viscosity profiles of the flours. On the other hand, the particle population of flours obtained by both millings presented a bimodal distribution in the three sorghum varieties.

Subsequently, the shelf life of the flours was analyzed, and it showed that the microbiological indicators were within the limit of the Argentine Food Code (CAA), both at the beginning and at the end of the storage test, except for total coliforms, which only did so when their counts decreased after 150 days (end of trial). Within the physicochemical parameters analyzed, the total titratable acidity and the secondary oxidation products, obtained in the accelerated oxidation test of all the flours, increased between the beginning and the course of the test, regardless of the type of milling. However, the peroxide value was below the limit established by the CAA for all the samples during the storage time.

Next, sponge cakes were made with white and brown sorghum flours using: on one hand the flours obtained in the previous stage with higher milling performance, lower ash content and lower particles size; and on the other, new flours with even smaller particle size, obtained by cyclonic milling and sieving. The viscosity profiles of the flours increased as the particle size decreased. The batters produced with flours of smaller particle sizes presented higher density and viscosity, with a distribution of small and homogeneous air bubbles. In addition, smaller particle sized flours led to cakes with higher volume and lower firmness, regardless of the variety of sorghum used.

Next, cookies were obtained from white and brown sorghum flours (whole and polished grain, with subsequent impact milling) and their mixtures with rice flour. The batters presented a solid-viscoelastic behavior. The cookies formulated with whole sorghum flour and its mixture with rice exhibited the highest hardness, with the best scores in the sensory evaluation test.

Finally, breads were made with white sorghum flours: whole obtained by impact milling, and partially refined produced by polishing and impact milling, and by roller mill with subsequent sieving. The breads made with flour produced by polishing and impact milling presented the largest distribution of alveoli and the lowest crumb hardness, with no evidence of collapse in the structure. The determination of phenolic compounds indicated that they were present in flours and decreased in breads, as well as the antioxidant capacity, with whole flour and the respective breads having the highest values. In the *in vitro* digestibility test, a decrease in the content of total polyphenols and their antioxidant activity was observed during all phases of digestion, except during intestinal digestion, where the antiradical activity increased. Also, the minerals content (Cu, Fe, Mn, and Zn) decreased during the *in vitro* digestion stages. A higher contribution of these minerals to the recommended daily dose (RDA) was found from a portion of bread made with whole flour. However, its bioavailability was reduced in the presence of a greater amount of bran.

These results provide information regarding the production and characteristics of sorghum flours and its use in foods. In this way, this work contributes to adding value to the production chain, improving its marketing conditions, and increasing the variety of gluten-free foods available.

ÍNDICE

1 Capítulo 1: Introducción General	1
1.1 Cultivo, producción y comercialización del grano de sorgo.....	1
1.2 Características del grano de sorgo	4
1.2.1 Carbohidratos	6
1.2.2 Proteínas.....	10
1.2.3 Lípidos.....	11
1.2.4 Minerales y vitaminas	12
1.2.5 Compuestos no nutritivos	13
1.3 Procesos de molienda seca de sorgo.....	16
1.3.1 Acondicionamiento	16
1.3.2 Tecnologías de molienda	17
1.4 Tamaño de partículas de las harinas.....	20
1.5 Principales usos del sorgo.....	24
1.6 Objetivos.....	26
1.6.1 Objetivo General	26
1.6.2 Objetivos Específicos.....	26
2 Capítulo 2: Análisis de los procesos de molienda de los granos de sorgo	27
2.1 Introducción	27
2.2 Materiales y métodos.....	29
2.2.1 Materiales	29
2.2.2 Fraccionamiento y acondicionamiento.....	29
2.2.3 Dureza de los granos.....	30
2.2.4 Pulido de los granos	30
2.2.5 Molienda de impacto (IM):.....	30
2.2.6 Molienda de rodillos (RM).....	31
2.2.7 Determinación del rendimiento de molienda, contenido de humedad y cenizas.....	32

2.2.8	Determinación del color de las harinas.....	33
2.2.9	Distribución de tamaño de partícula de las harinas	34
2.2.10	Perfiles de viscosidad de las harinas.....	35
2.2.11	Diseño experimental y análisis de superficies respuestas.....	36
2.2.12	Análisis estadístico	37
2.3	Resultados y discusión.....	38
2.3.1	Dureza de los granos	38
2.3.2	Efecto de la molienda sobre el rendimiento y el contenido de cenizas de las harinas.....	39
2.3.3	Distribución de tamaño de partículas de la harina (PSD).....	42
2.3.4	Propiedades de <i>pasting</i> de las harinas.....	47
2.3.5	Color de las harinas	51
2.3.6	Análisis de la combinación de variables de molienda.....	53
2.3.7	Análisis multivariado	56
2.4	Conclusiones.....	59
3	Capítulo 3: Análisis de la calidad de las harinas de sorgo durante su almacenamiento	60
3.1	Introducción	60
3.2	Materiales y métodos.....	63
3.2.1	Materiales	63
3.2.2	Proceso de molienda	63
3.2.3	Diseño del ensayo de almacenamiento prolongado de las harinas.....	64
3.2.4	Determinación de indicadores microbiológicos.....	64
3.2.5	Acidez total titulable en harinas (ATT)	65
3.2.6	Índice de Peróxidos (IP)	65
3.2.7	Perfiles de viscosidad.....	66
3.2.8	Ensayo de oxidación acelerada	66
3.2.9	Análisis estadístico	67
3.3	Resultados y discusión.....	68
3.3.1	Caracterización microbiológica de harinas.....	68
3.3.2	Determinación de acidez total titulable en harinas (ATT).....	70

3.3.3	Análisis de los perfiles de viscosidad de las harinas.....	73
3.3.4	Evaluación de la producción de compuestos de oxidación.....	75
3.3.5	Ensayo de oxidación acelerada	78
3.4	Conclusiones.....	81
4	Capítulo 4: Efecto de harinas de sorgo en la calidad de bizcochuelos libres de gluten	82
4.1	Introducción	82
4.2	Materiales y métodos.....	86
4.2.1	Materiales	86
4.2.2	Obtención de harinas para la elaboración de bizcochuelos.....	86
4.2.3	Composición proximal.....	87
4.2.4	Contenido de polifenoles totales	88
4.2.5	Almidón dañado.....	89
4.2.6	Capacidad de retención de agua (WRC)	90
4.2.7	Perfiles de viscosidad.....	90
4.2.8	Análisis de tamaño de partículas.....	90
4.2.9	Elaboración de los bizcochuelos	91
4.2.10	Caracterización de los batidos.....	91
4.2.11	Análisis microscópico de los batidos	91
4.2.12	Caracterización de los bizcochuelos.....	93
4.2.13	Análisis sensorial	95
4.2.14	Análisis estadístico	96
4.3	Resultados y discusión.....	97
4.3.1	Composición proximal y propiedades de hidratación de las harinas	97
4.3.2	Distribución de tamaño de partículas de las harinas.....	100
4.3.3	Propiedades de <i>pasting</i> de las harinas.....	102
4.3.4	Caracterización de batidos y bizcochuelos.....	106
4.3.5	Análisis sensorial.....	113
4.4	Conclusiones.....	115
5	Capítulo 5: Efecto de harinas de sorgo en la calidad de galletitas libre de gluten	116

5.1	Introducción	116
5.2	Materiales y métodos	120
5.2.1	Materiales	120
5.2.2	Obtención de harinas para la elaboración de galletitas.....	120
5.2.3	Composición proximal, propiedades de hidratación y contenido de polifenoles.....	121
5.2.4	Perfiles de viscosidad.....	121
5.2.5	Análisis de tamaño de partículas.....	122
5.2.6	Formulación y preparación de las galletitas	122
5.2.7	Estudios reológicos de las masas	123
5.2.8	Caracterización de las galletitas.....	123
5.2.9	Análisis estadístico.....	126
5.3	Resultados y discusión.....	127
5.3.1	Propiedades de las harinas obtenidas.....	127
5.3.2	Tamaño de partículas de las harinas.....	129
5.3.3	Propiedades de pasting de las harinas	131
5.3.4	Reología de las masas	135
5.3.5	Características tecnológicas de las galletitas	138
5.3.6	Análisis Sensorial.....	142
5.4	Conclusiones.....	145
6	Capítulo 6: Efecto de harinas de sorgo en la calidad de panes libres de gluten	146
6.1	Introducción	146
6.2	Materiales y métodos	150
6.2.1	Materiales	150
6.2.2	Caracterización de harinas	150
6.2.3	Elaboración de panes	150
6.2.4	Caracterización de los batidos: resistencia a la extrusión	151
6.2.5	Evaluación de la calidad de los panes	152
6.2.6	Evaluación del contenido de polifenoles y su capacidad antioxidante en harinas y panes de sorgo	154

6.2.7	Identificación de compuestos polifenólicos por HPLC-DAD-ESI-MS/MS en harinas y panes de sorgo	155
6.2.8	Ensayo de digestibilidad <i>in vitro</i>	156
6.2.9	Análisis estadístico	160
6.3	Resultados y discusión.....	161
6.3.1	Propiedades de las harinas utilizadas en la formulación de panes	161
6.3.2	Caracterización de los batidos/masas para panes	163
6.3.3	Caracterización de los panes	164
6.3.4	Digestibilidad <i>in vitro</i> de panes	175
6.4	Conclusiones.....	185
7	Conclusiones generales y perspectivas futuras	187
8	Divulgación de resultados	191
8.1.1	Publicaciones de artículos en revistas internacionales con referato	191
8.1.2	Trabajos presentados en eventos Científico-Tecnológicos	192
9	Referencias bibliográficas	193

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Principales países productores (a) y exportadores (b) de sorgo	2
Figura 2.2. Áreas sembradas con sorgo durante el periodo 2018-2019 (Bernardi, 2019)	2
Figura 2.3. Panojas de sorgos graníferos rojos (a) y blancos (b)	3
Figura 2.4. Imágenes de granos de sorgo blanco (a), rojo (b) y marrón (c).....	4
Figura 2.5. Esquema de las principales secciones (a) y microfotografía electrónica (b) de un corte longitudinal de un grano de sorgo.....	5
Figura 2.6. Fotografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido de la microestructura del endospermo vitreo (a) y harinoso de un grano de sorgo (b).....	6
Figura 2.7. Esquema de las moléculas de amilosa y amilopectina.	7
Figura 2.8. Representación de la curva de viscosidad resultante (a) de las transiciones del gránulo de almidón durante el calentamiento-enfriamiento (b).....	8
Figura 2.9. Representación esquemática de una curva de “pasting” característica obtenida por RVA.....	9
Figura 2.10. Esquemización de la estructura de repetición en taninos condensados (a), la estructura general de un flavonoide (b) y la estructura general de un ácido fenólico (c).....	14
Figura 2.11. Formula estructural del ácido fítico.....	15
Figura 2.12. Esquema de un pulidor de tipo tangencial (TADD).	17
Figura 2.13. Diagrama general de un molino de martillos.	18
Figura 2.14. Esquema general de un molino de rodillos.	19
Figura 2.15. Representación esquemática de un molino ciclónico.	20
Figura 2.16. Esquemización de la moda, la mediana y el promedio en una distribución de tamaño de partículas.....	22
Figura 2.17. Relación entre distribuciones de frecuencia y frecuencia acumulada.	22
Figura 2.1. Esquema de los procesos de pulido y molienda realizados para la obtención de las muestras.....	32
Figura 2.2. Escala de color CIE Lab	33
Figura 2.3. Ejemplo de un gráfico de distribución de tamaño de partículas.	34

Figura 2.4. Curvas representativas del ensayo de fuerza o carga de compresión versus el tiempo de aplicación de granos de sorgo.	38
Figura 2.5. Textura de granos de sorgo acondicionados a tres humedades diferentes.	39
Figura 2.6. Distribución de tamaño de partículas de harinas se sorgo blanco (a), sorgo Gen (b) y sorgo Summer II (c) obtenidas mediante molienda por rodillos.	44
Figura 2.7. Distribución de tamaño de partículas de harinas obtenidas mediante molienda por impacto en sorgo blanco (a, b, c), sorgo Gen 417 (d, e y f) y sorgo Summer II (g, h, i).	46
Figura 2.8. Perfiles de viscosidad de harinas de sorgo molidas por rodillos (a, b, c) e impacto (d, e, f).	50
Figura 2.9. Efecto de la humedad y el tiempo de pulido sobre el rendimiento de molienda (a) y el contenido de cenizas (b) en harinas de sorgo blanco.	54
Figura 2.10. Efecto de la humedad y el tiempo de pulido sobre la viscosidad del sistema en harinas de sorgo blanco (a) y sorgo Gen 417 (b).	54
Figura 2.11. Análisis de componentes principales (PCA) de la harina de sorgo producida por molienda de rodillos (a) y de impacto (b) después del pulido.	57
Figura 3.1. Comparación del efecto del almacenamiento sobre la acidez de las harinas obtenidas mediante molienda de impacto y rodillos.	72
Figura 3.2. Representación esquemática de la técnica de Rancimat (a) y de la determinación gráfica del tiempo de inducción (Ti) (b).	78
Figura 3.3. Tiempos de inducción de harinas de sorgo obtenidos a los 0, 90 y 150 días de almacenamiento.	79
Figura 4.1. Análisis de imágenes de batidos obtenidas por MO utilizando el software Image J 1.48a.	92
Figura 4.2. Imagen característica construida con el sistema Volscan Profiler.	93
Figura 4.3. Curva típica de un análisis de perfil de textura.	94
Figura 4.4. Patrones de distribución de tamaño de partícula de las harinas de sorgo blanco (a) y marrón (b).	101
Figura 4.5. Propiedades de pasting de harinas de sorgo blanco (a) y sorgo marrón (b) suspendidas en agua destilada.	106
Figura 4.6. Microfotografías de batidos obtenidos con harina de sorgo blanco y marrón.	108
Figura 4.7. Fotografías de bizcochuelos elaborados con harina de sorgo blanco y marrón.	113
Figura 5.1. Gráfico típico resultante de una prueba de flexión de tres puntos.	124

Figura 5.2. Fotografía de la cabina sensorial (a) y las muestras utilizadas (b).....	125
Figura 5.3. Cuestionario modelo utilizado para la evaluación sensorial.....	126
Figura 5.4. Distribución de tamaño de partículas de harinas de sorgo, arroz (a) y sus mezclas (b).....	131
Figura 5.5. Perfiles de viscosidad de harinas de sorgo (a) y sus mezclas con harina de arroz (b) suspendidas en agua destilada.....	133
Figura 5.6. Figura. Propiedades de pasting de harinas de sorgo y arroz puras (a) suspendidas en solución de sacarosa al 50% y sus respectivas mezcla sorgo/arroz (b).	134
Figura 5.7. Imágenes de galletitas de harina de sorgo y sus mezclas harina de arroz.	140
Figura 5.8. Perfil sensorial de galletitas elaboradas con harina de sorgo y arroz.	143
Figura 6.1. Curva representativa obtenida en un ensayo de compresión.....	151
Figura 6.2. Fotografía de una rodaja de pan, mostrando el área seleccionada para el análisis de imagen (a). Esta selección es luego transformada en imagen de 8-bits (b) y posteriormente binarizada, obteniéndose la imagen mostrada en (c).	153
Figura 6.3. Representación esquemática del proceso de digestión <i>in vitro</i>	158
Figura 6.4. Fotografías de panes de sorgo obtenidos con harina de sorgo blanco integral (WWS-IM), pulido más molienda de impacto (PWS-IM) y molienda por rodillos más tamizado (WS-RM).....	167
Figura 6.5. Fragmentación propuesta para dicafeoil espermidina (a) y cafeoil feruoil espermidina (b).....	173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Contenido de vitaminas y minerales en el grano de sorgo.	12
Tabla 2.1. Caracterización de las harinas obtenidas por molienda de impacto y de rodillos.	41
Tabla 2.2. Determinación del tamaño de partículas.....	43
Tabla 2.3. Propiedades de pasting de las harinas.....	48
Tabla 2.4. Parámetros de color de las harinas.....	52
Tabla 2.5. Coeficientes de regresión y significancia estadística del modelo de predicción para las variables de respuesta.	55
Tabla 3.1. Determinación de coliformes totales (a), mohos y levaduras (b) y aerobios mesófilos (c) en harinas de sorgo al inicio y final del ensayo de almacenamiento.....	69
Tabla 3.2. Determinación de la acidez total en harinas almacenadas durante 150 días. .	71
Tabla 3.3. Perfiles de viscosidad de harinas obtenidas mediante molienda de rodillos.	73
Tabla 3.4. Perfiles de viscosidad de harinas obtenidas por molienda de impacto.....	74
Tabla 4.1. Caracterización de harinas para la elaboración de bizcochuelos.	99
Tabla 4.2. Parámetros de distribución del tamaño de partícula de las harinas de sorgo blanco y marrón.	102
Tabla 4.3. Propiedades de pasting de las harinas de sorgo utilizadas en la elaboración de bizcochuelos.....	104
Tabla 4.4. Características de los batidos obtenidos con harinas de sorgo.	110
Tabla 4.5. Características de los bizcochuelos obtenidos con harinas de sorgo.....	112
Tabla 5.1. Ingredientes utilizados en la formulación de galletitas.....	122
Tabla 5.2. Caracterización de harinas de sorgo y sus mezclas con harina de arroz....	128
Tabla 5.3. Parámetros de distribución de tamaño de partículas.....	130
Tabla 5.4. Parámetros de viscosidad de las harinas obtenidos en agua y solución agua/sacarosa.	132
Tabla 5.5. Parámetros reológicos de masas para galletitas	137
Tabla 5.6. Caracterización de las galletitas elaboradas con harina de sorgo.....	139
Tabla 5.7. Análisis sensorial de galletitas elaboradas con harina de sorgo.....	143

Tabla 6.1. Parámetros de RVA de las harinas utilizadas en la elaboración de panes.	161
Tabla 6.2. Tamaño de partículas de las harinas empleadas en la elaboración de panes.	162
Tabla 6.3. Determinación de color de las harinas utilizadas en la elaboración de panes.	163
Tabla 6.4. Fuerza de extrusión de los diferentes batidos.	163
Tabla 6.5. Características tecnológicas de los panes elaborados con harina de sorgo.	165
Tabla 6.6. Identificación de compuestos fitoquímicos en extractos hidrometanólicos de harina y pan de sorgo. Características cromatográficas y moleculares de cada compuesto identificado.....	171
Tabla 6.7. Determinación del contenido de polifenoles y actividad antioxidante durante el proceso de digestión <i>in vitro</i>	177
Tabla 6.8. Contenido de minerales en harinas y panes.....	181
Tabla 6.9. Porcentaje de la dosis diaria recomendada (DDR) de minerales cubierta por una porción de pan de sorgo.....	182
Tabla 6.10. Dializabilidad (%) de minerales en panes durante el proceso de digestión <i>in vitro</i>	183

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

-80: malla de 80 μm

a*: color rojo

AACC: Asociación Americana de Químicos de Cereales (American Association of Cereal Chemists)

ABTS: ABTS [2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico)]

ACP: análisis de componentes principales

AD: almidón dañado

ANOVA: análisis de varianza

AOAC: Asociación de Químicos Agrícolas Oficiales (Association of Official Agricultural Chemists)

Ash%: contenido de cenizas (%)

AT^oT: acidez total titulable en harinas

b*: color amarillo

BD: viscosidad de ruptura o desintegración

ChT: carbohidratos totales

Chv: cohesividad

CMC: carboximetilcelulosa

CP1: componente principal 1

CP2: componente principal 2

D10: diámetro donde el 10% de la distribución tiene un tamaño de partículas más pequeñas y el 90% más grande

D4,3: diámetro medio de Brouckere

D50: diámetro donde el 50% de la población está por debajo/por encima

D90: diámetro donde el 90% de la distribución tiene un tamaño de partícula más pequeño y el 10% tiene un tamaño de partícula más grande

DAD: detector de diodos ultrasensible

DDR: dosis diaria recomendada

Dz: dializabilidad

E: elasticidad

EE. UU: Estados Unidos

F: firmeza de la miga

FA: fracción de área (% área de alvéolos)

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)

FRAP: Poder de reducción antioxidante del ion férrico

FV: viscosidad final

G: gomosidad

G': módulo elástico

G'': módulo viscoso

H: humedad alta

Hf: humedad final (%)

Hi: humedad inicial (%)

HI: molienda ciclónica

HPLC: cromatografía líquida de alta performance

HPMC: hidroxipropilmetilcelulosa

IM: molienda de impacto

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

IP: índice de peróxidos

L*: luminosidad

L: humedad baja

M: humedad media

M: masticabilidad

MIP - OES: espectrómetro de emisión óptica de plasma inducida por microondas

MO: microscopía óptica

MS: masa

MY%, rendimiento de molienda (%)

N: Newton

PCA: análisis de componentes principales

PSD: distribución de tamaño de partículas de la harina

PSG: sorgo Gen 417 pulido

PSII: sorgo Summer II pulido

PT: temperatura de pico o pasting

PV: pico de viscosidad

PWS: sorgo blanco pulido

QTOF: tiempo de vuelo cuadrupolo

RENALOA: Red Nacional de Laboratorios Oficiales de Análisis de Alimentos

RF: harina de arroz

RM: molienda de rodillos

RVA: analizador rápido de viscosidad

SB: retrogradación

SG 417: sorgo Gen 417 (sorgo marrón)

SII: sorgo Summer II (sorgo rojo)

Span: índice de polidispersidad

SSL: estearoil lactilato de sodio

TA: tamaño promedio de alveolos

Tan δ : tangente de δ

Ti: tiempo de inducción

TPA: análisis de perfil de textura

TPF: contenido de polifenoles totales

UFC: unidades formadoras de colonias

USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

VE: volumen específico

VM: viscosidad media

WRC : capacidad de retención de agua

WS: sorgo blanco

WSG: sorgo Gen 417 integral

WSII: sorgo Summer II integral

WWS: sorgo blanco integral

1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 CULTIVO, PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DEL GRANO DE SORGO

El sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es una gramínea de origen tropical que ha sido adaptada, a través del mejoramiento genético, a una gran diversidad de ambientes (Carrasco et al., 2011). Es el quinto cereal en importancia producido en Argentina y en el mundo después del maíz, trigo, arroz y cebada (FAO, 2018; SIIA, 2016). Este cultivo posee buenas características agronómicas: es resistente a las plagas y enfermedades, muestra una relativa adaptabilidad al tiempo de siembra y puede desarrollarse en zonas áridas, lo que permite una amplia distribución geográfica (Pérez et al., 2010; Taylor et al., 2006). También es utilizado como cultivo de rotación, ya que resulta beneficioso para el suelo y tiene bajo costo con relación al maíz, especialmente en periodos de sequía, debido a la eficiencia en la utilización de los recursos hídricos (Barberis y Sánchez, 2013).

Dentro de los principales países productores de sorgo se encuentran Nigeria, Estados Unidos (EE UU), e India (Figura 2.1 a), sin embargo, de ellos sólo EUA (Figura 2.1 b) se consolida como exportador. Esto indica que gran parte de la producción mundial es utilizada por los mismos países, principalmente de las regiones de Asia y África. La posibilidad de adaptarse a suelos con bajos regímenes hídricos y su relativo bajo costo hacen que el sorgo juegue un papel fundamental en la seguridad alimentaria de millones de personas que viven en áreas tropicales semiáridas de países sub y no desarrollados (Arendt y Zannini, 2013).



Figura 2.1. Principales países productores (a) y exportadores (b) de sorgo

En Argentina la producción tradicionalmente se realiza en la región pampeana siendo las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba y La Pampa las de mayor superficie implantada (en orden descendiente de importancia), aunque en las últimas campañas se ha registrado una importante siembra en el noreste del país (Bernardi, 2019) (Figura 2.2). Es interesante mencionar que desde el año 2013 se realizan siembras en la Patagonia en el marco del Plan Sorgo-Maíz 2012/2013 (Barberis y Sánchez, 2013).

Argentina es actualmente el segundo exportador de granos de sorgo a nivel mundial, habiendo alcanzado 900.000 toneladas en la campaña 2020-2021 (Colombo, 2021; USDA, 2021), detrás de EE. UU. con 5 millones de toneladas. El 62% de la producción nacional es destinada a la exportación, mientras que el resto es utilizada principalmente para consumo animal y solo el 8% es industrializado (Colombo, 2021).

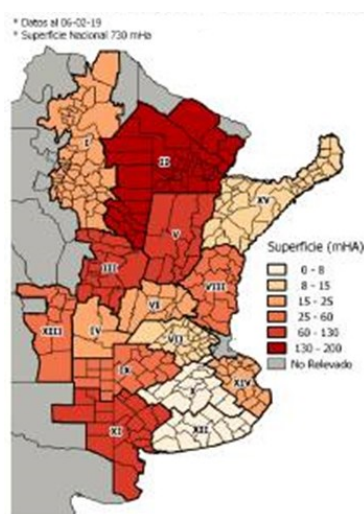


Figura 2.2. Áreas sembradas con sorgo durante el periodo 2018-2019 (Bernardi, 2019)

El sorgo, al igual que el arroz y el maíz, es una gramínea que pertenece a la familia *Gramineae*, y a la especie, *Sorghum bicolor* (L.) Moench (Taylor y Kruger, 2018). Originalmente existían los sorgos forrajeros tipo sudán y los graníferos (con o sin taninos) con bajo potencial de rendimiento en grano. Sin embargo han sido desarrollados nuevos materiales foto-sensitivos, de nervadura marrón y con elevada concentración de azúcares en tallo, lo que posibilita ampliar el mercado con una mayor diversidad de materiales (Bernardi, 2019).

El sorgo se clasifica en dos grandes grupos como forrajero o granífero. Los cultivares tipo forrajero actuales (para pastoreo directo o silaje) poseen una alta producción de biomasa, gran capacidad de rebrote y alta relación hoja/tallo que beneficia el aprovechamiento directo por los animales y la posibilidad de confeccionar henos de buena calidad nutricional. (Carrasco et al., 2011).

Por otro lado, el sorgo del tipo granífero (Figura 2.3 a y b) puede contener o no taninos. Son utilizados principalmente como aporte de energía en sistemas de engorde intensivo. También tienen como destino la exportación directa de granos, industrias de alimentos balanceados y molienda seca para alimentación humana (Carrasco et al., 2011). El color del pericarpio no define la presencia de taninos sino la testa, que se encuentra debajo de este. Incluso sorgos con pericarpio blanco pueden tener una testa pigmentada no distinguible a simple vista y contener taninos (Rooney et al., 2002).

El sorgo granífero se divide en tres clases: la clase blanca contiene granos con un pericarpio blanco sin testa pigmentada y no contiene taninos (USDA, 2021). Los sorgos con taninos (pardos) tienen una testa pigmentada muy definida con niveles de taninos condensados variables que pueden ofrecer resistencia a las aves y al moho del grano (de Morais Cardoso et al., 2017). El sorgo mixto contiene una mezcla de granos con y sin testa pigmentada.



Figura 2.3. Panojas de sorgos graníferos rojos (a) y blancos (b)

1.2 CARACTERÍSTICAS DEL GRANO DE SORGO

Los granos de sorgo son generalmente esféricos y pueden ser de color blanco (Figura 2.4 a), rojo (Figura 2.4 b), amarillo o marrón (Figura 2.4 c) (Arendt y Zannini, 2013). El grano posee tres regiones anatómicamente distintivas, el pericarpio (capa externa), el endospermo (estructura de almacenamiento de almidón) y el germen (embrión) (Figura 2.5 a).

El pericarpio, que es rico en fibra dietética insoluble, representa del 4,3 al 8,7% del grano de sorgo (Shankar y Dayanandan, 2020). Se subdivide en tres tejidos, (desde el lado exterior) el epicarpio, el mesocarpio y el endocarpio. El epicarpio está cubierto con una fina capa de cera y contiene la mayoría de los pigmentos del grano de sorgo; por lo tanto, tiene una gran influencia en el color del grano. El mesocarpio contiene gránulos de almidón, que es una característica exclusiva del sorgo y mijo (Serna-Saldivar y Rooney, 1995). Se ha sugerido que la presencia de gránulos de almidón en el mesocarpio puede explicar la alta friabilidad del pericarpio del sorgo (Taylor y Dewar, 2001). La friabilidad es un atributo negativo del pericarpio para la molienda en seco porque provoca la fragmentación en pedazos finos, escapando así a la separación y contaminando la harina. Algunos cultivares de sorgo tienen una subcapa pigmentada (testa) entre el pericarpio y el endospermo. La testa pigmentada contiene taninos condensados (Shankar y Dayanandan, 2020). Los taninos protegen a estos sorgos contra el ataque de insectos, pájaros y hongos. Hasta hace poco, los taninos de sorgo se consideraban indeseables debido a sus propiedades antinutritivas ya que forman complejos con macromoléculas alimentarias como las proteínas, reduciendo así sus digestibilidades. Sin embargo, investigaciones actuales indican que los taninos tienen beneficios para la salud, ya que actúan como antioxidantes (Awika y Rooney, 2004).



Figura 2.4. Imágenes de granos de sorgo blanco (a), rojo (b) y marrón (c)

El germen conforma aproximadamente el 9,8 % del grano de sorgo, se encuentra en el interior del grano contiguo a las capas externas. Contiene particularmente lípidos, además de proteínas y enzimas necesarias para el desarrollo de una nueva planta (Belton y Taylor, 2002).

El grano de sorgo posee un elevado contenido de almidón, cerca de un 70% de su masa total, con una proporción 3:1 de amilopectina/amilosa (Palavecino et al., 2016). Por otro lado, en el sorgo ceroso, o waxy, el almidón está compuesto por amilopectina (más de 97%) con propiedades similares a las de maíz waxy (Serna-Saldivar y Rooney, 1995).

El endospermo constituye aproximadamente 84% del grano de sorgo, posee principalmente almidón y proteínas con bajas cantidades de lípidos y fibra. A su vez en el endospermo se puede encontrar 3 zonas diferenciadas; la capa de aleurona, el endospermo córneo o vítreo y el endospermo harinoso (Figura 2.5 b) (Arendt y Zannini, 2013)

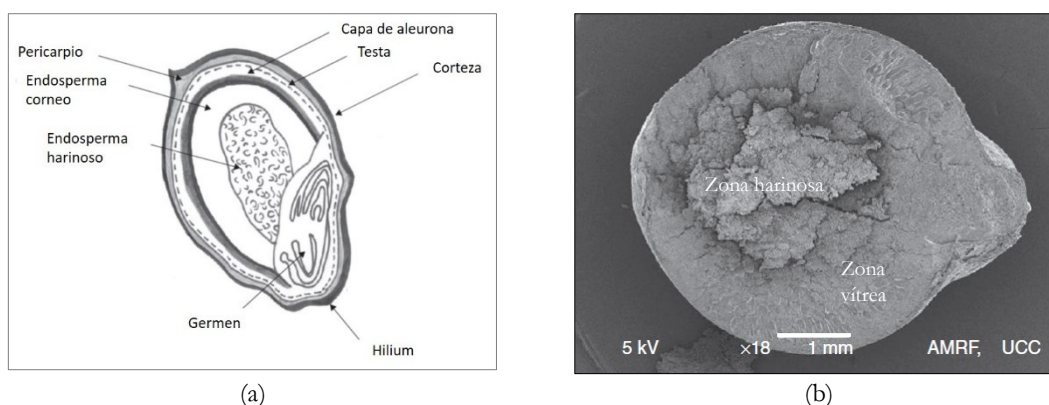


Figura 2.5. Esquema de las principales secciones (a) y microfotografía electrónica (b) de un corte longitudinal de un grano de sorgo.

(Tomado de Arendt y Zannini, 2013)

Las células del endospermo córneo y harinoso están compuestas por gránulos de almidón, matriz proteica, cuerpos proteicos y una pared celular delgada rica en β -glucanos y hemicelulosa. En el endospermo córneo o vítreo, la matriz proteica rodea los gránulos de almidón y los cuerpos proteicos están incrustados en la matriz; la apariencia es translúcida y la textura vítrea (Figura 2.6 a). Los gránulos tienen forma poligonal, a menudo contienen indentaduras de los cuerpos proteicos. El endospermo harinoso opaco se encuentra alrededor del centro geométrico del grano. Tiene una matriz proteica discontinua, con espacios vacíos y gránulos de almidón redondos y

angulares que no están unidos a la estructura (Figura 2.6 b), es como lo indica su nombre opaco cuando se lo ilumina con un haz de luz (Buitimea-Cantúa et al., 2013).

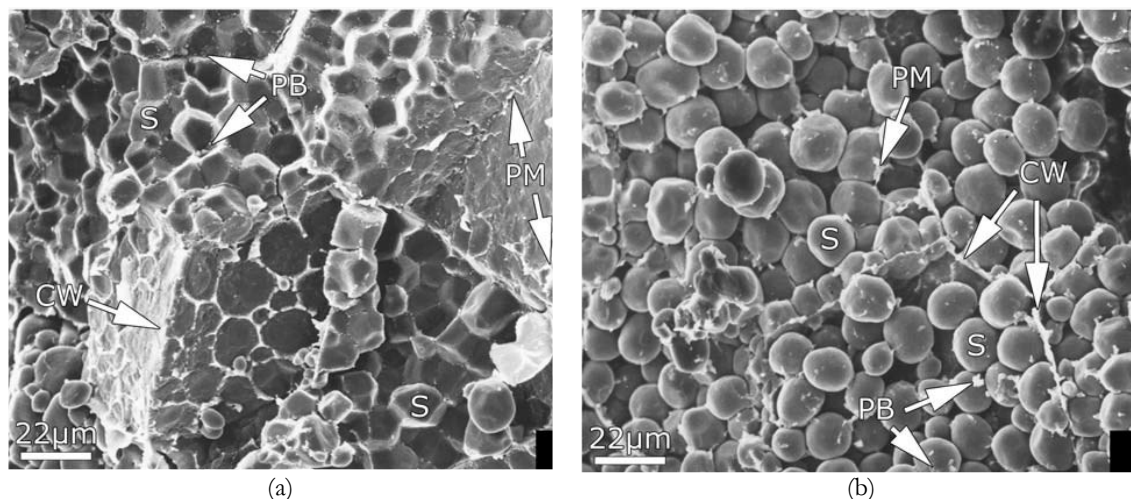


Figura 2.6. Fotografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido de la microestructura del endospermo vitreo (a) y harinoso de un grano de sorgo (b).

CW: pared celular; PB: cuerpo proteico; PM: matriz proteica; S: gránulos de almidón. Tomado de Serna-Saldivar (2010).

1.2.1 Carbohidratos

El sorgo contiene carbohidratos no estructurales (almidón, azúcares y fructosanos) y estructurales (que forman parte de la fibra). La mayor parte de esta es insoluble (86,2%), se encuentra en el pericarpio y las paredes celulares del endospermo, y está constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina y gomas. La fracción soluble se compone por β -D-glucanos y pentosanos, que se localizan principalmente en el pericarpio (Wrigley et al., 2004).

El almidón es el principal carbohidrato no estructural del sorgo y representa la principal fuente de energía necesaria para la germinación. El tamaño de los gránulos de almidón de sorgo varía de 2 a 30 μm y el tamaño típico se encuentra en el rango de 10 a 16 μm (Belton y Taylor, 2002).

El almidón se encuentra formado por dos polímeros de glucosa: amilosa y amilopectina (Figura 2.7). La amilosa es fundamentalmente un polímero lineal que consta de monómeros de glucosa (entre 500 y 600 unidades) unidas por enlaces α -(1-4). En cambio, la amilopectina es un polímero ramificado formado por numerosas cadenas cortas de glucosa (3105 a 3106 unidades) unidas

principalmente por enlaces α - (1-4) con ramificaciones resultantes de enlaces α -(1-6) que aparecen cada 20-25 unidades (Shannon et al., 2009).

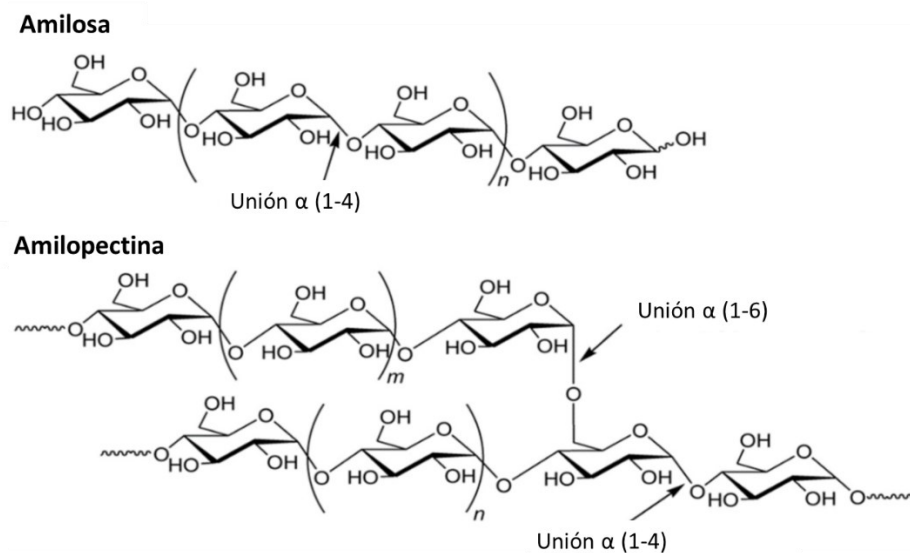


Figura 2.7. Esquema de las moléculas de amilosa y amilopectina.

El almidón nativo es insoluble en agua fría y en la mayoría de los solventes orgánicos, lo cual es particularmente asociado con la presencia de la fracción insoluble o escasamente soluble de amilosa. La mayor parte del almidón consumido por los seres humanos es sometida a algún tipo de procesamiento, que generalmente implica la aplicación de calor en presencia de humedad bajo cizallamiento, para luego enfriarlo. La gelatinización ocurre cuando el almidón nativo se calienta en presencia de suficiente humedad. Los gránulos absorben agua y se hinchan, y la organización cristalina se altera irreversiblemente (Figura 2.8) (Copeland et al., 2009).

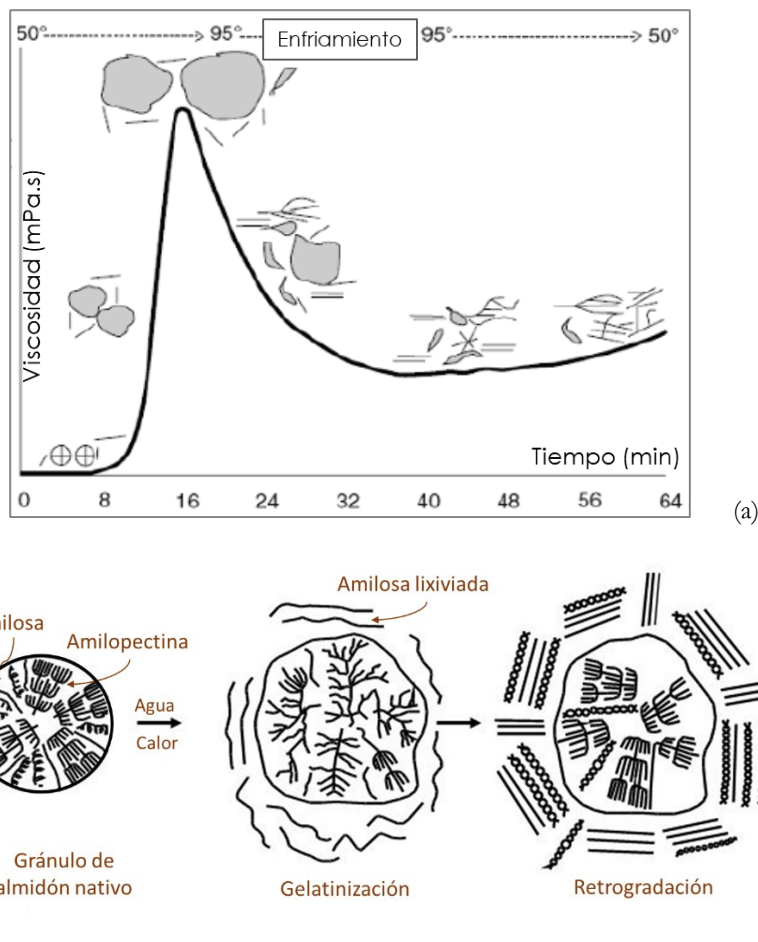


Figura 2.8. Representación de la curva de viscosidad resultante (a) de las transiciones del gránulo de almidón durante el calentamiento-enfriamiento (b).

Los cambios de viscosidad ocurridos por efecto del calentamiento y enfriamiento proveen una curva característica, que puede analizarse mediante varios métodos. Dentro de estos, el analizador rápido de viscosidad (RVA, por sus siglas en inglés) es uno de los más utilizados por su versatilidad y simple operación. Se basa en determinar la resistencia al flujo ante un esfuerzo de corte constante, durante un ciclo térmico que involucra el calentamiento y enfriamiento de una dispersión de almidón. La viscosidad del sistema es medida y registrada durante todo el proceso y se obtiene un gráfico de la viscosidad y temperatura de la dispersión en función del tiempo (perfil de “*pasting*”) (Figura 2.9).

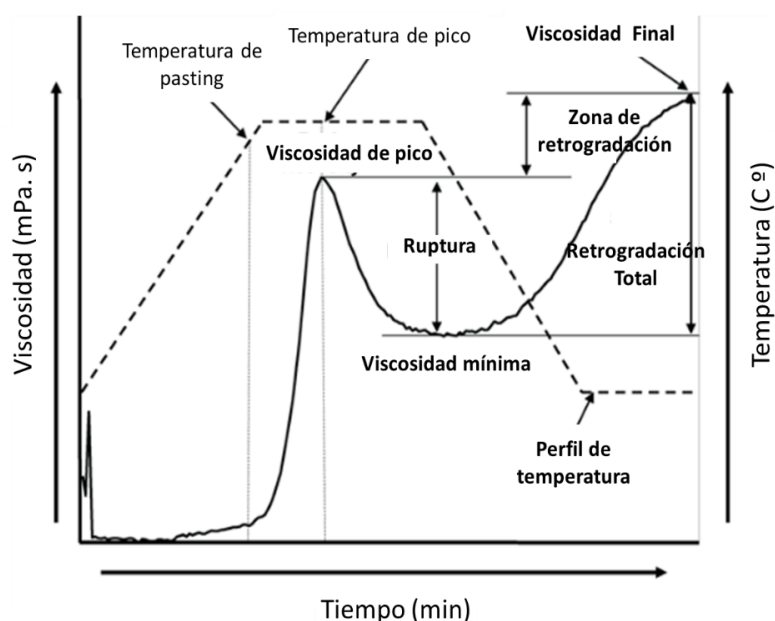


Figura 2.9. Representación esquemática de una curva de “pasting” característica obtenida por RVA

Durante el calentamiento de la dispersión se produce un aumento de viscosidad relacionado con el proceso de gelatinización del almidón. La temperatura de gelatinización, medida por calorimetría de barrido (DSC), de la mayoría de los almidones se encuentra entre 60 °C y 80 °C, en condiciones no limitantes de agua. Temperaturas elevadas se relacionan con un alto grado de cristalinidad, lo que revela una mayor estabilidad estructural y resistencia de los gránulos a la gelatinización (Barichello et al., 1990). De la misma manera, la entalpía de gelatinización es interpretada normalmente como la cantidad de la estructura de doble hélice que es desorganizada durante el calentamiento en presencia de agua (Xie et al., 2008). El pico de viscosidad (PV) (Figura 2.9) ocurre cuando un número suficiente de gránulos de almidón de la harina se hinchan debido a la absorción de agua y al aumento de temperatura, provocando una máxima viscosidad del sistema. Luego, durante la etapa de mantenimiento de la temperatura y agitación, la viscosidad cae levemente debido a la ruptura de algunos gránulos y a la reorientación en sentido del flujo de las moléculas de amilosa liberadas al medio (lixiviación) durante la gelatinización. Posteriormente, la viscosidad comienza a aumentar nuevamente a medida que el sistema se enfría, debido a la reasociación de las moléculas de amilosa hasta un máximo (viscosidad final, FV). Dentro de los parámetros que se pueden obtener de estas curvas se encuentran la ruptura o “breakdown”, que es una medida de la desintegración de los gránulos hinchados por acción de las fuerzas de corte y la retrogradación o “setback” o que mide de la tendencia que poseen las moléculas de amilosa a retrogradar durante el

enfriamiento del sistema. Este último parámetro depende de la capacidad de gelación de la amilosa (Copeland et al., 2009).

La función del almidón en la preparación de productos de panificación ha recibido menos atención que las proteínas, especialmente las formadoras del gluten, debido a que estas son las principalmente responsables de las características viscoelásticas de productos horneados como el pan. Dentro de las principales funciones del almidón en la panificación se encuentra: 1) diluir el gluten dando una consistencia deseable; 2) proveer una superficie apta de adhesión para el gluten; 5) absorber agua del gluten durante la gelatinización para establecer la red de gluten y así evitar el colapso de la masa durante el enfriamiento; 3) suministrar azúcar para las fermentaciones; 4) favorecer la retención del gas formado y 6) aportar a la textura al producto final. En el caso de productos horneados sin gluten, el almidón cobra un rol más preponderante debido a que proporciona estructura y textura al producto final.

En la industria de los alimentos, los almidones se aplican principalmente como agentes humectantes, espesantes y gelificantes (Dapčević Hadnadev et al., 2013). A su vez, para mejorar sus propiedades funcionales y aumentar su versatilidad en diferentes condiciones de procesamiento, los almidones nativos pueden ser modificados. Esto se puede llevar a cabo mediante el uso de métodos físicos, procesos bioquímicos o químicos. La modificación física incluye los efectos producidos por los siguientes factores en los gránulos de almidón: temperatura/humedad, presión, cizallamiento, radiación ultravioleta y recientemente, algunas técnicas novedosas, como el tratamiento mediante campos eléctricos pulsados, sinéresis iterada y el proceso de descompresión instantánea controlada. Sin embargo, las modificaciones químicas del almidón son las más frecuentes y se destacan: el tratamiento con ácido, el entrecruzamiento, la oxidación y sustitución, incluidas la esterificación y la eterificación (Kaur et al., 2012).

1.2.2 Proteínas

El contenido de proteína del grano de sorgo varía de 6 a 18%, con un promedio de 11%. El contenido y composición de esta fracción pueden fluctuar sustancialmente dependiendo de las condiciones agronómicas (disponibilidad de agua, fertilidad del suelo, temperatura y condiciones ambientales durante el desarrollo del grano) y genotipo.

El endospermo contiene glutelinas y kafirinas (prolaminas del sorgo) que representan alrededor del 80% del total de proteínas, mientras que albúminas y globulinas ricas en lisina, predominan en el germen (Belton y Taylor, 2002).

Las kafirinas de sorgo se pueden clasificar en tres clases principales: α , β y γ , según el peso molecular y la solubilidad. Estas fracciones son similares a las subfracciones de zeína del maíz (Shull et al., 1990). Según sea harinoso o vítreo, el endospermo del sorgo contiene alrededor de 66 a 84% de α -kafirinas, 8 a 13% de β -kafirina y 9 a 21% de γ -kafirina. Se encuentran principalmente en gránulos proteicos esféricos, con un diámetro promedio de alrededor de 2 μm que están estrechamente empaquetados dentro de una red proteica, formada por una matriz de glutelina y gránulos de almidón (Belton y Taylor, 2002).

Con respecto a los aminoácidos libres, el sorgo tiene en general un alto contenido de ácido glutámico, leucina, alanina, prolina y ácido aspártico. Desde un punto de vista nutricional, la lisina y la treonina representan el primer y segundo aminoácidos más limitantes en las proteínas del sorgo. Sin embargo, el contenido de lisina de sorgo proporciona aproximadamente el 40% del nivel diario/porción recomendada para bebés (Adiamo et al., 2018).

1.2.3 Lípidos

Los lípidos del sorgo al igual que los de otros cereales se localizan principalmente en el germen, aunque también hay cantidades menores presentes en el endospermo. Las tres clases principales de lípidos pueden clasificarse como lípidos no polares, glicolípidos y fosfolípidos. El contenido total de lípidos reportado en la literatura varía desde 2,1% hasta 6,6%, dependiendo del tipo de cultivo y locación (Belton y Taylor, 2002).

La composición de los lípidos es también diversa, especialmente según el método de extracción empleado. Serna-Saldivar & Rooney (1995) indicaron un rango para el ácido de palmítico (16:0) de 11,6 a 14,3%, mientras que Maestri et al. (1996), utilizando éter de petróleo como método de extracción informaron un rango de 15,1 a 24,8%. En el caso del ácido oleico (18:1) el rango informado fue entre 30,5 - 40,9% y 29,9 - 41,8%, según Serna-Saldivar & Rooney (1995) y Maestri et al. (1996), respectivamente.

1.2.4 Minerales y vitaminas

El sorgo es fuente de minerales como fósforo, potasio y zinc; dentro de los cuales el primero es más abundante y cuyos contenidos varían según el lugar de cultivo (Tabla 2.1) (Martino et al., 2012). Los minerales se localizan principalmente en el pericarpio, la capa de aleurona y el germen; por lo tanto, los productos de sorgo refinados pierden parte de estos importantes nutrientes (Arendt y Zannini, 2013). Desde un punto de vista nutricional en el sorgo se destaca el contenido de hierro, zinc y calcio, considerados minerales esenciales que suelen ser deficientes en dietas humanas (Gómez-Galera et al., 2010).

Tabla 2.1. Contenido de vitaminas y minerales en el grano de sorgo.

Minerales (mg/100 g bs*)		Vitaminas (mg/g salvo indicación específica)	
Mayoritarios			
Ca	30	Tiamina (B1)	0,46
Cl	52	Riboflavina (B2)	0,15
K	277	Niacina (B3)	4,84
Mg	148	Piridoxina (B6)	0,59
Na	11	Ácido Pantoténico (B5)	1,25
P	305	Biotina (B7)	0,02
S	116	Ácido fólico (B9)	0,02
Si	200	Carotenos (mg/Kg)	29,00
Minoritarios		Vitamina E (mg/Kg)	12,00
Cu	1,0		
Fe	7,0		
Mn	2,6		
Zn	3,0		

Tomado de Arendt y Zannini (2013), * bs: base seca

La biodisponibilidad de la mayoría de los minerales del sorgo aún es poco conocida. Sin embargo, se sabe que la biodisponibilidad de zinc varía entre 9,7 y 17,1% mientras que la de hierro oscila entre 6,6 y 15,7% (Afify et al., 2011; Kruger et al., 2013). Se han realizado estudios para aumentar el contenido y la biodisponibilidad de hierro y zinc a través de la biofortificación, fortificación y mejoramiento genético del sorgo (Kruger et al., 2013; Tripathi et al., 2012; Tripathi y Platel, 2013).

Respecto al contenido de vitaminas en el sorgo, cabe señalar que es fuente de vitaminas liposolubles (D, E y K) y del complejo B (tiamina, riboflavina y piridoxina), excepto B12 (de Morais Cardoso et al., 2017; Taylor, 2018) (Tabla 2.1). Las concentraciones de tiamina, riboflavina y niacina en el sorgo son comparables a las del maíz (Kulamarva et al., 2009). Algunas variedades de sorgo de endospermo amarillo contienen β -caroteno que el cuerpo humano puede convertir en vitamina A (Duodu, 2019).

1.2.5 Compuestos no nutritivos

1.2.5.1 Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos se originan a partir del metabolismo secundario de las plantas, cuando están sometidas a condiciones de estrés, tales como infecciones, lesiones mecánicas y radiación. Se conoce que juegan un papel defensivo natural en la planta, protegiéndola contra plagas y enfermedades (Naczki y Shahidi, 2004).

El sorgo es una buena fuente de tres clases de compuestos fenólicos: ácidos fenólicos, flavonoides y taninos (Figura 2.10). Sus concentraciones son influenciadas por el cultivo y las condiciones de crecimiento.

Todas las variedades de sorgo contienen compuestos fenólicos, aunque los tipos y niveles presentes están relacionados con el color del pericarpio y la presencia de testa pigmentada (Dykes y Rooney, 2006). En la Figura 2.10 a, se observa la polimerización de una unidad básica de repetición (flavanol) que conforma la estructura de los taninos condensados. Estos son excelentes antioxidantes y aumentan los niveles de fibra dietaria en productos alimenticios (Dykes y Rooney, 2006). Sin embargo, algunos de ellos disminuyen la digestibilidad de proteínas y almidones y otorgan un sabor amargo (Awika and Rooney 2004).

Los taninos del sorgo varían en cuanto al tipo, contenido y distribución de los oligómeros y polímeros individuales. La mayor parte de los taninos del sorgo están condensados y constituidos por oligómeros o polímeros de catequinas (flavan-3-oles y/o flavan-3,4-dioles) (Awika y Rooney, 2004).

Por otra parte, la mayoría de los flavonoides del sorgo también se encuentran en las capas exteriores del grano. De este modo, las diferencias en el color y grosor del pericarpio y la presencia de la testa influyen en la concentración y perfil de flavonoides (Awika, McDonough, et al., 2005; Dykes et al., 2009). Tres clases de flavonoides se encuentran en grandes proporciones: antocianinas, flavonas y flavononas (Figura 2.10 b). Las antocianinas de sorgo pertenecen a la clase de las 3-desoxiantocianidinas y corresponden hasta el 79% del contenido de flavonoides. El contenido de 3-desoxiantocianidinas se correlaciona con su color y actividad antioxidante (Dykes y Rooney, 2006; Shih et al., 2007; Taleon et al., 2012). También se ha descrito la presencia de las flavonas apigenina y luteolina, que predominan en los sorgos pigmentados, y otros flavonoides como flavanonas, naringenina, eriodictiol, flavonol kaempferol y flavanonol taxifolina (Dykes y Rooney, 2006; Svensson et al., 2010).

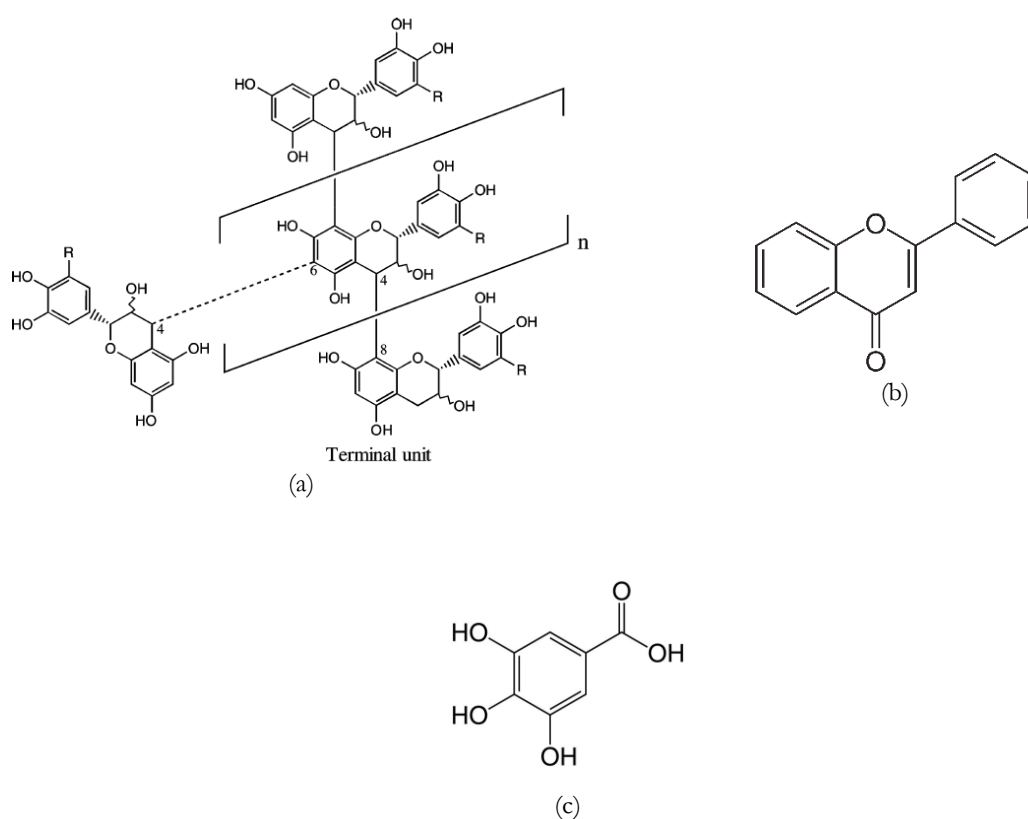


Figura 2.10. Esquemización de la estructura de repetición en taninos condensados (a), la estructura general de un flavonoide (b) y la estructura general de un ácido fenólico (c).

Modificado de (Dykes y Rooney, 2006; Schofield et al., 2001).

Los ácidos fenólicos (Figura 2.10 c) corresponden a una pequeña familia de compuestos fenólicos derivados del fenilpropanoide, que tiene numerosas implicancias en la resistencia a las enfermedades de las plantas y en la salud humana (Chong et al., 2009). Dentro de este grupo se han identificado los ácidos hidroxibenzoico y los ácidos hidroxicinámicos. El sorgo blanco contiene trazas de trans-piceid (hasta 0,1 mg/kg) y el trans-resveratrol está ausente, mientras que en el sorgo rojo están presentes estas dos clases (Bröhan et al., 2011).

1.2.5.2 Fitatos

El ácido fítico o fitato o es un compuesto que contiene fósforo (P) generado por la fosforilación gradual del mioinositol. Este juega un papel importante en la germinación y está relacionados con la síntesis de ácido abscísico y giberelinas, las hormonas involucradas en la germinación de las semillas. Sin embargo, en esta forma el P permanece no disponible para el hombre y animales monogástricos, debido a la insuficiente actividad de fosfatasas endógenas (fitasas), capaces de liberar el grupo fosfato de la estructura del fitato (Gibson et al., 2010). Los efectos del ácido fítico en la nutrición humana y animal están relacionados con la interacción del ácido fítico con proteínas, vitaminas y varios minerales, y por lo tanto restringe su biodisponibilidad (Silva et al., 2021).

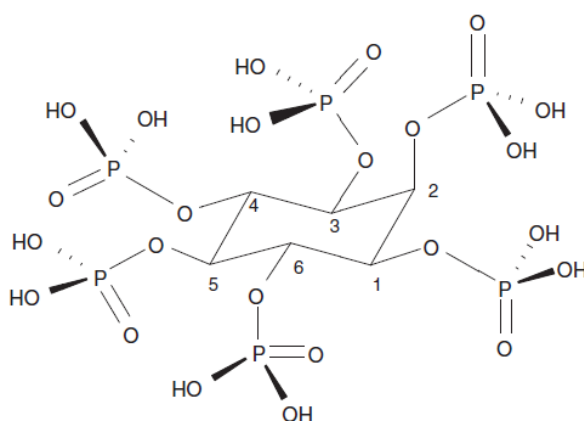


Figura 2.11. Formula estructural del ácido fítico

Al igual que la mayoría de los minerales se localiza principalmente en las capas externas del grano, por lo que el nivel de fitatos en la harina/sémola/grano descortezado está directamente relacionado con el grado de eliminación de estas capas (Feizollahi et al., 2021). La disminución del

contenido de ácido fítico en las plantas es deseable para la dieta humana, aunque puede afectar la germinación y la viabilidad de las semillas (Silva et al., 2021).

1.3 PROCESOS DE MOLIENDA SECA DE SORGO

1.3.1 Acondicionamiento

El acondicionamiento es una operación previa a la molienda, que consiste en añadir agua a los granos, dejándolos reposar aproximadamente 24 horas, aunque la cantidad de tiempo exacta necesita ser optimizada en función del tipo de cereal. Este proceso se realiza fundamentalmente para aumentar la tenacidad de la fibra (salvado), lo que evita que se rompa en fragmentos muy pequeños y difíciles de separar. También el aumento de la humedad suaviza el endospermo facilitando su molienda (Kweon et al., 2009a). Sin embargo, un exceso de humedad plantea algunos inconvenientes como un aumento del gasto de energía y una reducción de la tasa de extracción de harina. Por lo tanto, el proceso de acondicionamiento debe mantener un equilibrio entre el nivel de extracción y un contenido aceptable de salvado de la harina (Hook et al., 1982).

El efecto sobre la absorción de agua, el movimiento y difusión durante el acondicionamiento de granos ha sido ampliamente estudiado para la molienda de trigo. Varios autores han demostrado que la tasa de absorción de agua está fuertemente influenciada por el cultivar utilizado, el contenido inicial de agua, el tamaño y la temperatura del grano, la estructura del endospermo, y el contenido y distribución de proteínas (Delwiche, 2000; Hook et al., 1982; Kang y Delwiche, 1999; Song et al., 1998). Sin embargo, aunque la velocidad de penetración del agua varía para diferentes cultivares de trigo, la difusión dentro del grano es esencialmente igual (Kweon et al., 2009a).

El acondicionamiento del sorgo para una extracción eficiente de la harina sigue siendo un desafío. Zhao y Ambrose (2017) analizaron el efecto del acondicionamiento con agua fría, agua caliente y vapor sobre las propiedades físicas y mecánicas del grano de sorgo. Demostraron que la dureza de los granos de sorgo sin tratar fue significativamente mayor que la de los granos acondicionados. Además, el tratamiento con calor permitió ablandar el endospermo de los granos y aumentar la resistencia del salvado; en comparación con aquellos templados con agua fría. Sin

embargo, el empleo de altas temperaturas produjo la gelatinización del almidón. También, Yoganandan et al. (2021) evaluaron el acondicionamiento de granos de sorgo con agua a temperatura ambiente, agua caliente y vapor previo a la molienda. Los resultados evidenciaron que el acondicionamiento con agua a temperatura ambiente (18% b.h por 24 h) condujo a una mejor separación del salvado y el endospermo sin afectar negativamente la calidad de la harina.

1.3.2 Tecnologías de molienda

Las tecnologías empleadas en la obtención de harina de sorgo incluyen diferentes procesos de descascarillado o decorticado y la reducción de tamaños de partículas o molienda. Generalmente el primer paso involucra la abrasión de las capas externas del grano, lo que reduce el salvado, parte del germen y ayuda a disminuir los taninos y el ácido fítico (Belton y Taylor, 2002).

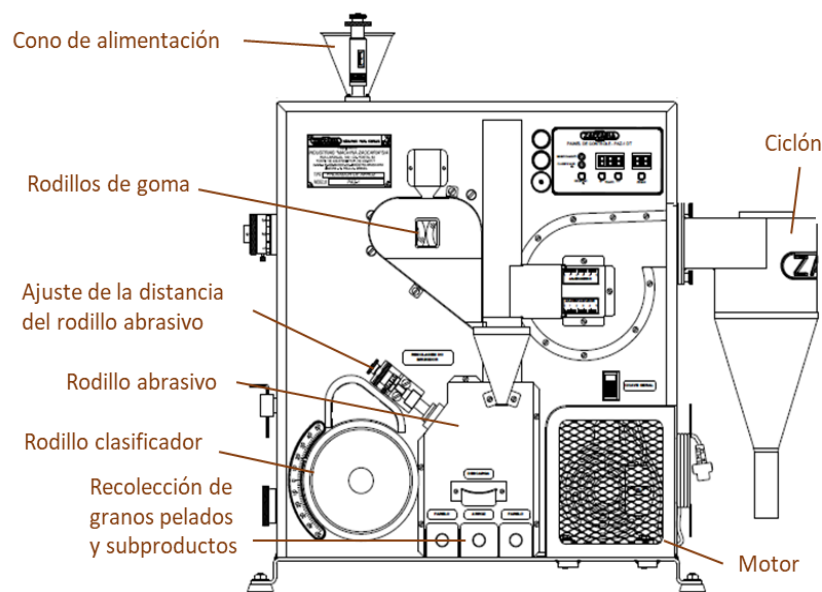


Figura 2.12. Esquema de un pulidor de tipo tangencial (TADD).

Tradicionalmente, en las zonas rurales, el descascarillado de los granos se efectúa a mano o con mortero de madera. Otro tipo de decorticación se basa en el pulido de los granos con un dispositivo abrasivo tangencial (TADD) (Figura 2.12). Este tipo de pelador es ampliamente utilizado para el pulido del grano de arroz. En el caso del sorgo, generalmente se emplea a escala de laboratorio para diferentes propósitos: mejorar la calidad nutricional (Sruthi y Rao, 2021;

Yetneberk et al., 2005), definir la cantidad de decorticación necesaria para mejorar el color y el rendimiento del cuscús de sorgo (Aboubacar et al., 2006), o para separar fracciones del grano de sorgo ricas en compuestos fenólicos y ceras (Lochte-Watson et al., 2000). Mediante el uso de rodillos abrasivos y posterior molienda por impacto se han obtenido harinas de colores más claros, y con menores contenidos de cenizas, taninos y grasa (Belton y Taylor, 2002).

En el caso de la molienda existen diferentes tecnologías que se pueden utilizar. La molienda por impacto generalmente emplea molinos de martillos. Este tipo de equipos contienen un rotor de alta velocidad que gira dentro de una carcasa cilíndrica (Figura 2.13). El rotor posee un collar con un determinado número de martillos en la periferia. Cuando el material de alimentación se introduce dentro de la cámara trituradora, primero se rompe por el impacto con los martillos giratorios y luego por el golpe contra la superficie interior de la carcasa. La fragmentación es el principal modo de fractura en los molinos de martillos de impacto. Las fracturas a lo largo y a través de los límites de grano ayudan a producir una distribución de tamaño bastante uniforme (Dey et al., 2013). Si bien el rendimiento del molino de martillos depende del tamaño de partícula inicial, las propiedades del material y la velocidad de alimentación, la propiedad más importante es el contenido inicial de humedad de la materia prima (Probst y Ileleji, 2013).

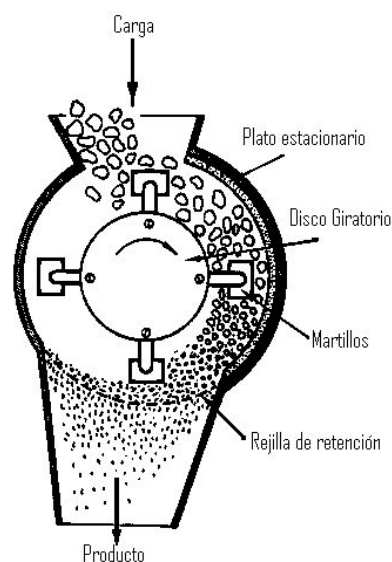


Figura 2.13. Diagrama general de un molino de martillos.

Por otra parte, en la molienda por rodillos se produce la reducción gradual del tamaño de los granos a la vez que se separan parcial o totalmente el germen y el salvado del endospermo. Esto se

realiza mediante pares de rodillos, normalmente estriados, que giran en direcciones opuestas (Figura 2.14), de manera que las partículas son atrapadas y sometidas a fuerzas de compresión que causan la reducción de tamaño. La superficie de los rodillos puede ser lisa, estriada o puede tener dientes (disco dentado), en función del efecto buscado. El endospermo dividido se pulveriza progresivamente entre los rodillos de reducción, hasta convertirlo en harina, mientras que el salvado y la sémola se separan mediante tamizado y purificación (Sakhare et al., 2020; Taylor y Kruger, 2018). Este tipo de molienda produce una variedad de fracciones de los granos, con diferentes propiedades nutricionales y funcionales (Sakhare et al., 2014).

Tradicionalmente la molienda por rodillos es utilizada en trigo, pero no en sorgo. A diferencia del primero, el endospermo del sorgo consta de partes duras (endospermo vítreo o translucido) y partes blandas (endospermo opaco), lo que se traduce en una mayor complejidad de la molienda (Hoseney, 1994). Los costos de producción son relativamente altos en relación con la baja tasa de extracción y las harinas obtenidas no tienen una buena aceptación de los consumidores debido a la coloración resultante (Oomah et al., 1981). Sin embargo, en los últimos años se comenzaron a utilizar en Sudáfrica, y luego en el resto del continente, molinos de rodillos para la producción de harina de sorgo, mediante la optimización de las condiciones del proceso para este cereal (van der Merwe et al., 2005).

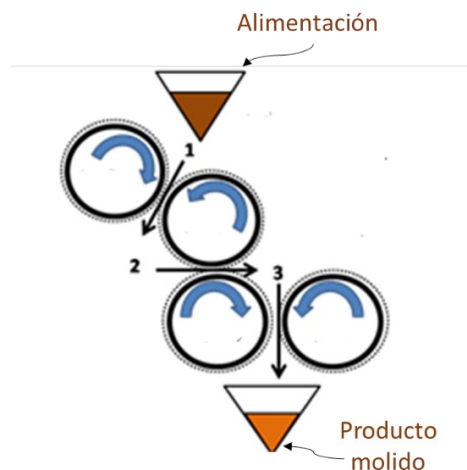


Figura 2.14. Esquema general de un molino de rodillos.

Una nueva tecnología de molienda, denominada molienda ciclónica, involucra la reducción de tamaño mediante una turbina que gira a alta velocidad e impulsa la muestra contra una superficie abrasiva, que junto con los altos impactos de los álabes de la turbina son los encargados de moler

rápidamente la muestra (Figura 2.15). Cuando las partículas molidas alcanzan el tamaño de los orificios de la malla, son impulsados hacia el exterior y recogidos. Los polvos finos son llevados por el efecto ciclónico hacia la parte superior del molino, y retenidos por un filtro especial. Produce alta capacidad de recuperación y fracciones de granulometría fina y uniforme. Además, posee un flujo de aire de gran volumen que le otorga funciones de autolimpieza y reduce el calentamiento de la muestra (Cyclotec 1093 brochure, 2012).

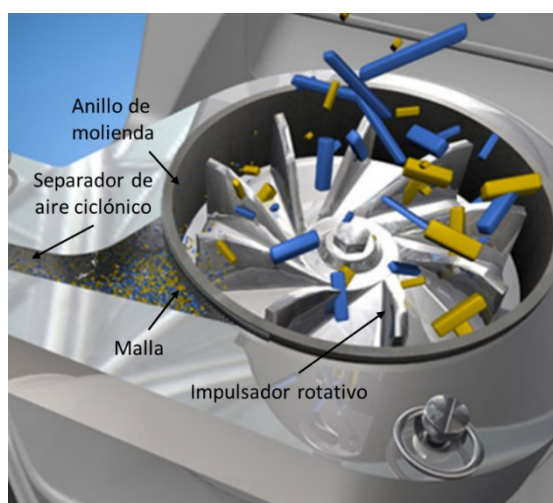


Figura 2.15. Representación esquemática de un molino ciclónico.

1.4 TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE LAS HARINAS

El sorgo no es capaz de formar una red de gluten debido a la composición y la estructura de sus proteínas, por lo que las características de las partículas obtenidas durante la molienda cobran mayor relevancia en la calidad del producto final. Investigaciones previas indican que el tamaño de las partículas que conforman la harina de granos afecta en general a la calidad de los productos horneados (de la Hera et al., 2013; Dhen et al., 2016; Trappey et al., 2015).

El término "tamaño" de un polvo o material particulado es relativo, dado que se usa a menudo para su clasificación, categorización o caracterización. La convención común considera que para un material particulado sea denominado polvo, su tamaño medio aproximado (50% del material es más pequeño que el tamaño medio y 50% es más grande) debe ser inferior a 1 mm. En ciertos ámbitos es común hablar de polvos "finos" y "gruesos" por lo que se han hecho varios

intentos para estandarizar la nomenclatura de partículas. Generalmente, el tamaño de partícula puede expresarse en diferentes unidades, dependiendo del rango de tamaño involucrado. Las partículas gruesas se pueden medir en centímetros o milímetros, las partículas finas en términos de tamaño de la malla utilizada en la molienda (mesh) y las partículas muy finas en micrómetros o nanómetros. Normalmente se puede considerar que los polvos alimenticios se encuentran en los rangos “fino” y “muy fino” (Barbosa-Cánovas et al., 2005).

Las partículas que forman un polvo pueden ser compactas, con longitud, ancho y espesor casi iguales, pero a veces pueden tener forma de placa o de aguja y raramente tendrán forma esférica. A medida que las partículas se hacen más pequeñas y por la influencia del desgaste debido a la manipulación, sus bordes pueden volverse más suaves; por lo tanto, pueden considerarse esféricas. En el caso de los materiales alimenticios, las partículas son en su mayoría de origen orgánico, su composición química es más complejas que la de polvos industriales inorgánicos, lo que conlleva a una gran diversidad de estructuras. Estas pueden presentar grados extremos de irregularidad (materiales molidos como especias y azúcar), hasta una esfericidad aproximada (almidón y levadura seca) o formas cristalinas bien definidas (azúcar granulado y sal) (Coulson y Richards, 2019).

En la práctica, la mayoría de los diámetros equivalentes se miden indirectamente tomando un número dado de partículas a partir de una muestra representativa. Se puede definir un gran número de diferentes tamaños medios o medias, es decir, medidas de tendencia central, para una distribución de tamaño de partícula determinada. El propósito de tales medidas de tendencia central es representar una población de partículas mediante una sola figura. Hay tres medidas importantes de tendencia central para una distribución de tamaño dada; la moda, la mediana y la media (Figura 2.16). La moda es el tamaño más común que ocurre, es decir, el tamaño correspondiente al pico en la curva de frecuencia de distribución de tamaño. Algunas distribuciones pueden tener más de un pico, y comúnmente se las denomina multimodales. La mediana, o el tamaño del 50%, es el tamaño en el que la mitad de las partículas son más grandes y la mitad son más pequeñas, es decir, el tamaño que divide el área bajo la curva de frecuencia de distribución en dos mitades (Barbosa-Cánovas et al., 2005).

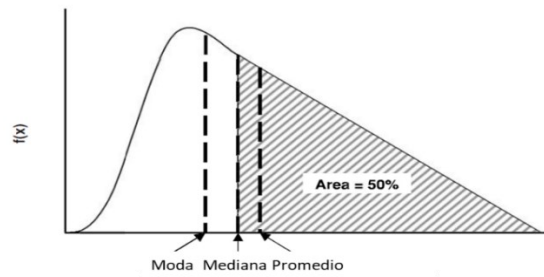


Figura 2.16. Esquemática de la moda, la mediana y el promedio en una distribución de tamaño de partículas.

Modificado de Barbosa-Cánovas et al. (2005).

La medición de la distribución del tamaño de partículas es un método común en cualquier proceso físico, mecánico o químico porque está directamente relacionado con el comportamiento del material y/o las propiedades físicas de los productos. La distribución del tamaño también es uno de los factores que más afectan la fluidez de los alimentos en polvo (Coulson y Richards, 2019).

La forma común de presentar los datos del tamaño de las partículas de diferentes polvos, incluidos los polvos alimentarios, es en forma de gráfico que representa la cantidad de partículas o la frecuencia del tamaño frente al tamaño de las partículas. Normalmente, el tamaño de las partículas se representa en el eje x, y la cantidad en el eje y. En general, la distribución del tamaño de los picos se puede presentar como frecuencia $f(x)$ o frecuencias acumuladas $F(x)$ (Figura 2.17).

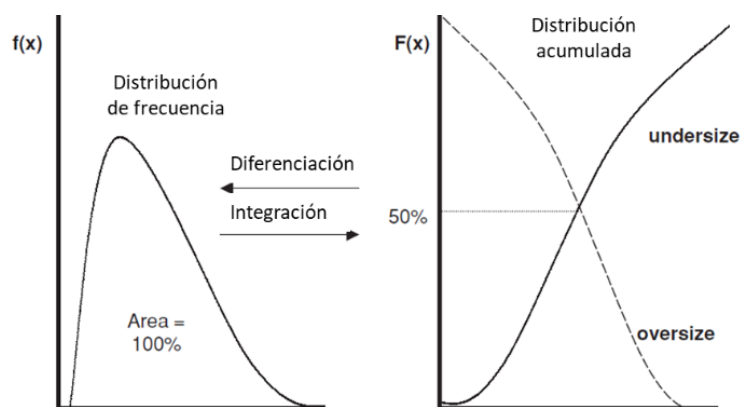


Figura 2.17. Relación entre distribuciones de frecuencia y frecuencia acumulada.

Modificado de Barbosa-Cánovas et al. (2005).

Los efectos de la composición y el tamaño de las partículas de la harina de trigo sobre la calidad de los productos horneados han sido ampliamente estudiados (Gómez et al., 2010; C. Liu et al., 2015; Moiraghi et al., 2013; Mousia et al., 2004). La harina de trigo forma una masa cohesiva y viscoelástica debido a las proteínas del gluten. Estas propiedades de la masa permiten contener las celdas de gas desarrolladas durante la fermentación de las levaduras, especialmente en panificados. Posteriormente la masa se endurece durante el horneado para formar una estructura similar a una esponja. Hosney (1994) señaló que un tamaño de partícula de harina de trigo más pequeñas, con la correcta absorción de agua: hace que la masa sea más cohesiva en la mayoría de los sistemas horneados. Sin embargo, un aumento adicional de la reducción del tamaño se asocia típicamente con un aumento en el daño del almidón (Gaines y Windham, 1998). Este provoca una mayor capacidad de absorción de agua; y, además, este componente es hidrolizado más fácilmente por la α -amilasa que el almidón nativo. La actividad de la amilasa conduce a la producción de dextrinas, que tienen un efecto importante en la capacidad de retención de agua y la porosidad de la masa, así como en la textura del pan, un exceso de dextrinas lleva a masas pegajosas lo que afecta sus propiedades reológicas (Barrera et al., 2007).

El tamaño de las partículas de las harinas asume especial relevancia para productos horneados donde la incorporación de aire se realiza durante el batido, como es el caso de bizcochuelos. Se sabe que la densidad del batido depende de la cantidad de burbujas de gas introducidas durante la mezcla mecánica, lo que también afecta la calidad del producto horneado. Algunos estudios indicaron que la utilización de harinas con partículas de mayor tamaño condujo a una menor densidad del batido permitiendo una mayor incorporación de aire (de la Hera et al., 2013; Dhen et al., 2016). Sin embargo, no solo es importante la cantidad de aire incorporado sino también su distribución y retención durante el horneado. Las partículas de harina con mayor tamaño pueden interferir en la formación de la emulsión debido a la coalescencia de las burbujas, lo que puede reducir la estabilidad del batido y, por lo tanto, afectar la de retención del gas en el horneado (Dhen et al., 2016). En este sentido los batidos realizados con harinas de menor tamaño de partículas permiten la formación de burbujas de aire más pequeñas y estables, que proporcionan una textura más suave y mayor volumen del producto (de la Hera et al., 2013).

En este contexto, el sorgo no presenta características especiales frente a otros cereales sin gluten, como el maíz o el arroz. Sin embargo, el sabor más suave de los cultivares de sorgo,

especialmente blancos, en comparación con otros cereales y otros tipos de sorgo constituyen una alternativa para la elaboración de productos horneados (Schober et al., 2005).

1.5 PRINCIPALES USOS DEL SORGO

El sorgo es un cultivo vital para millones de personas especialmente en África y Asia ya que forma parte de su alimentación básica en forma de preparados simples (Taylor, 2018). Los granos de sorgo triturados se emplean generalmente para la preparación de papilla y cuscús. Estos se preparan cociendo harina de sorgo con agua y dependiendo de la región pueden cocinarse a pH neutro, acidificarse a $\text{pH} < 4,0$ con ácido láctico, fermentación o acidificación con zumo de frutas, o alcalinizarse ($\text{pH} 8,2$) por cocción con cenizas. La cocción en agua en general reduce sustancialmente la digestibilidad de las proteínas de sorgo, debido a que el núcleo central de las α -kafirinas está rodeado por una capa de β - y γ -kafirinas, que forma una capa de disulfuro alrededor del cuerpo de las proteínas al cocinarse, lo que dificulta el acceso de las enzimas proteolíticas. Este efecto adverso puede aliviarse con la fermentación ácido láctica (Taylor y Taylor, 2002). Otros beneficios nutricionales de esta fermentación incluyen una mejor digestibilidad del almidón, mejoramiento en los niveles de vitaminas B, reducción de anti nutrientes como taninos y ácido fítico y, disminución de los riesgos por contaminación microbiológica del alimento (Taylor y Dewar, 2001). Por otra parte, el sorgo malteado también es utilizado en la elaboración de un tipo de cerveza llamada “dolo” (rojiza, turbia u opaca) y en bebidas no fermentadas (Dicko et al., 2006).

En partes de América Central y México, el sorgo se ha utilizado con éxito como reemplazo total o parcial para el maíz en la producción de tortillas (Taylor y Dewar, 2001). Su empleo involucra algunos cambios en el procesamiento, a medida que aumenta la proporción de sorgo utilizados para la elaboración de la masa, los tiempos de cocción y remojo de los granos deben reducirse (Taylor y Dewar, 2001). Además, esto puede impartir un color amarillo verdoso a las tortillas debido a los polifenoles que se encuentran en la parte externa del grano. Si el sorgo se descorteza, este color se reduce o elimina, sin embargo, es necesario reducir el tiempo de cocción y la concentración de cal para evitar que la masa se vuelva demasiado pegajosa. En general, el uso de sorgo blanco mejora el color de las tortillas en comparación con el maíz amarillo (Taylor et al., 2006).

En países desarrollados la mayor parte del sorgo producido se emplea para la alimentación animal y la exportación (FAO, 2018). También es utilizado en producción de almidón, dextrosa, bebidas, alcohol, papel, adhesivos y en el refinamiento de minerales (Pérez y col., 2010). Además, resulta especialmente atractivo para la obtención de bioetanol y otros productos bio-industriales como plásticos, especialmente en áreas secas donde otros cultivos no crecen tan fácilmente (Taylor et al., 2006).

Más de la mitad de la producción argentina de sorgo se destina al mercado externo, mientras que internamente se emplea principalmente en alimentación animal (Barberis y Sánchez, 2013). La incorporación al mercado de los híbridos de color blanco, sin taninos, ha permitido mejorar la calidad para la elaboración de alimentos. Como se mencionó anteriormente, numerosos estudios indicaron la viabilidad de utilizar harina de sorgo en la elaboración de productos alimenticios tales como panes (Adiamo et al., 2018; Mtelisi Dube et al., 2020; Schober et al., 2005; Trappey et al., 2015), tortillas (Yousif et al., 2012), pasta (Liu et al., 2012; Palavecino, Ribotta, et al., 2019a; Suhendro et al., 2000), cerveza (Taylor et al., 2006), bizcochuelos (Taylor y Anyango, 2011) y galletitas (Dayakar Rao et al., 2016). También, se han obtenido productos para necesidades especiales como alimento infantil instantáneo, rico en lisina (6,01%), aminoácidos azufrados (5,41%) e histidina (3,04%) (Mohammed et al., 2011).

En función de lo descripto anteriormente consideramos que el grano de sorgo posee beneficios agronómicos, funcionales y nutricionales que posibilitan una amplia variedad de usos. Sin embargo, en nuestra región existe muy poca información sistematizada sobre la relación entre los diferentes híbridos de sorgo cultivados y los métodos de molienda sobre las propiedades fisicoquímicas de las harinas y la calidad de los alimentos horneados. Para incrementar el uso de este cultivo en la formulación de alimentos y agregar valor a su cadena de producción, se requiere una comprensión profunda de cómo el tipo de grano y el proceso de molienda afectan las propiedades de las harinas. Por ello, en esta tesis se planteó como objetivo general analizar el efecto de las condiciones de molienda de diferentes tipos de sorgo sobre las características químicas, funcionales y tecnológicas de sus harinas con el fin de obtener ingredientes adecuados para la elaboración de productos horneados.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

Analizar el efecto de las condiciones de molienda de diferentes tipos de sorgo sobre las características químicas, funcionales y tecnológicas de sus harinas, con el fin de obtener ingredientes adecuados para la elaboración de productos horneados.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Evaluar los efectos de los procesos de acondicionamiento y molienda de diferentes tipos de sorgo sobre las propiedades fisicoquímicas de sus harinas.
- Analizar los cambios fisicoquímicos y microbiológicos que ocurren durante el almacenamiento de harinas de sorgo.
- Estudiar los efectos de las harinas de sorgo obtenidas por diferentes tipos de molienda sobre las propiedades reológicas, estructurales y tecnológicas de masas y batidos.
- Analizar el efecto de las diferentes fracciones de harina de sorgo sobre la calidad tecnológica, sensorial y nutricional de los panificados.
- Analizar las relaciones entre los cambios fisicoquímicos y funcionales de las harinas, generados por los tipos de molienda, con la calidad de los productos horneados.

2

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE MOLIENDA DE LOS GRANOS DE SORGO

2.1 INTRODUCCIÓN

La molienda de los granos tiene gran influencia sobre las características de las harinas obtenidas. Generalmente, a nivel industrial la molienda de sorgo involucra un proceso de pulido o perlado de los granos para remover el pericarpio y la testa, seguido de una reducción de tamaño del endospermo mediante molienda de impacto (molino de martillos) (Belton y Taylor, 2002). También, la molienda de rodillos se ha aplicado con éxito para producir harina de sorgo, pero en menor medida (Delcour y Hosney, 2010; van der Merwe et al., 2005). El sorgo posee un pericarpio extremadamente friable y un endospermo más duro en comparación con el trigo (Aboubacar et al., 2006). Por ello, la molienda de rodillo gradual, que es comúnmente utilizada para trigo debido al surco ventral del grano, no lo es para sorgo principalmente por la menor eficiencia de separación.

La harina de sorgo no es capaz de formar una red de gluten cuando es amasada con agua debido al tipo y composición de sus proteínas, por lo que las características de las partículas obtenidas durante la molienda cobran relevancia en la calidad del producto final. El pulido elimina parcial o totalmente la capa exterior del grano, mientras que el molino de rodillos produce una rotura gradual del grano, y luego, mediante tamización se separan las diferentes fracciones para extraer las partículas de endospermo. Esto puede afectar a las propiedades moleculares y estructurales del almidón, como el grado de daño del gránulo (almidón dañado), e influir en su funcionalidad (Barrera et al., 2013; Huang et al., 2008). Normalmente, menores tamaños de

partícula, junto con una correcta absorción de agua, producen una mayor cohesión de la masa en la mayoría de los sistemas de cocción. Sin embargo, una reducción adicional del tamaño de partícula se asocia con un aumento de daño en el almidón, elevando la capacidad de hidratación de las harinas (León et al., 2006).

Varios estudios han caracterizado las condiciones de molienda de la harina de sorgo. Zhao y Ambrose (2017) analizaron el efecto del acondicionamiento de granos de sorgo con agua fría, caliente y vapor sobre las propiedades físicas y mecánicas del grano, aunque no evaluaron la molienda. Langó et al. (2018) utilizaron la molienda de sorgo con rodillos y tamizado, con o sin decorticación, y no encontraron diferencias significativas en el rendimiento y los componentes químicos de la harina. Por el contrario, Al-Rabadi (2013) obtuvo harina de sorgo mediante molienda por impacto, utilizando distintos tamaños de mallas en el molino y posterior tamizado, e informó que las harinas presentaron contenidos de almidón significativamente diferentes, según el tamaño de partícula obtenido. Rumler et al. (2021) investigaron el uso de la molienda por rodillos y la molienda de piedras para granos de sorgo, y observaron que las harinas obtenidas tuvieron diferencias significativas en sus propiedades químicas y físicas. Palavecino et al. (2019b) utilizaron molienda de bolas para granos de sorgo blanco parcialmente pulidos, y encontraron que las harinas obtenidas presentaron cambios significativos en sus propiedades funcionales. Sin embargo, en la bibliografía encontrada no se describen las relaciones entre diferentes híbridos de sorgo, métodos de molienda y acondicionamiento del grano con diferentes humedades y las propiedades de la harina.

En este capítulo se describe la obtención de harinas de sorgo a partir de dos híbridos coloreados (marrón y rojo) y uno blanco. Se analizaron los efectos del acondicionamiento del grano antes de la molienda y de dos procesos de molienda sobre las propiedades fisicoquímicas y tecnológicas de las harinas obtenidas. Esto permitió seleccionar las condiciones de molienda más adecuadas según el tipo de sorgo utilizado, para producir harinas con características deseadas para la elaboración de diferentes productos.

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 Materiales

Se utilizaron tres híbridos comerciales de granos de sorgo cultivados en Argentina: un sorgo rojo, Summer II (SII), un sorgo marrón, Gen 417 (SG 417), y un sorgo blanco (WS), todos multipropósitos. Los granos de sorgo rojo y marrón fueron provistos por INTA (Estación Experimental Anguil, La Pampa, Argentina) y los de sorgo blanco fueron suministrados por Praga S.R.L (Argentina).

2.2.2 Fraccionamiento y acondicionamiento

Los granos fueron sometidos a un proceso de limpieza mediante lavado con agua y posterior secado a 25 °C en estufa hasta alcanzar una humedad menor al 8%, para luego ser almacenados a 6 ± 2 °C hasta su utilización. Posteriormente fueron acondicionados a tres contenidos de humedades: baja (~8%) (L), media (~12%) (M) y alta (~16%) (H). Se separaron en fracciones de 1 kg y se colocaron en bolsas plásticas y agregó la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad deseada (Ecuación 2.1). Posteriormente se cerraron las bolsas herméticamente, se las agitó a distintos intervalos de tiempo para alcanzar una distribución uniforme del agua incorporada. Finalmente, las bolsas cerradas se dejaron en reposo durante 24 h y se determinó el porcentaje de humedad alcanzado.

$$W (g) = \frac{Hf\% - Hi\%}{100 - Hf\%} \quad (2.1)$$

Donde W es el agua necesaria (g), Hf es la humedad final (%) y Hi es la humedad inicial (%).

2.2.3 Dureza de los granos

La dureza de los granos se determinó mediante un ensayo de compresión con un analizador universal de textura (Instron, EUA). Se colocó un grano por cada medición en el centro de la placa y se sometió a un test de compresión hasta rotura. Se utilizó una celda de compresión de 5 kg, una sonda cilíndrica de 25 mm de diámetro y una velocidad de compresión 100 mm/min. Se realizaron al menos 15 determinaciones para cada muestra. La dureza de los granos se expresó como la fuerza máxima en N requerida para comprimir la muestra hasta su rotura.

2.2.4 Pulido de los granos

Una fracción de granos limpios y acondicionados de cada híbrido fue sometida a pulido por piedra abrasiva giratoria (Pelador para arroz escala de laboratorio, PAZ-DTA1, Brasil). Se ensayaron dos tiempos de abrasión: 60 s y 180 s, de acuerdo a estudios previos (Dayakar Rao et al., 2016; Liu et al., 2012; Suhendro et al., 2000). El rendimiento final del proceso fue calculado mediante la diferencia de peso de las muestras antes y después del proceso de pulido.

Se realizaron dos lotes de pulido de cada híbrido para obtener los grupos de granos pulidos por diferentes tiempos (60 s y 180 s) y con diferente humedad inicial (L, M y H), y se colocaron en bolsas plásticas hasta su molienda.

2.2.5 Molienda de impacto (IM):

Los granos enteros (sin pulir) y pulidos fueron molidos utilizando un molino de impacto (Fritsch Pulverisette 16, Alemania), equipado con una malla de 0,75 mm.

Las muestras obtenidas fueron:

- Harina de sorgo blanco Integral (WWS), acondicionado a bajo (WWS-IM-L), medio (WWS-IM-M) y alto (WWS-IM-H) contenido de humedad.

- Harinas de sorgo blanco pulido (PWS) (60 s y 180 s), acondicionado a baja (PWS-IM-L), medio (PWS-IM-M) y alto (PWS-IM-H) contenido de humedad.
- Harinas de sorgo Summer II (WSII) integral, acondicionado a baja (WSII-IM-L), medio (WSII-IM-M) y alto (WSII-IM-H) contenido de humedad.
- Harinas de sorgo Summer II (PSII) pulido (60 s and 180 s), acondicionado a baja (PSII-IM-L), medio (PSII-IM-M) y alto (PSII-IM-H) contenido de humedad.
- Harinas de sorgo Gen 417 (WSG) integral, acondicionado a bajo (WSG-IM-L), medio (WSG-IM-M) y alto (WSG-IM-H.) contenido de humedad.
- Harinas de sorgo Gen 417 (PSG) pulido (60 s and 180 s), acondicionado a bajo (PSG-IM-L) medio (PSG-IM-M) y alto (PSG-IM-H) contenido de humedad.

2.2.6 Molienda de rodillos (RM)

Por otra parte, se sometió a molienda de rodillos (RM) a granos limpios y acondicionados a las mismas humedades que para molienda por impacto (L, M, H). Se utilizó un molino con tres pares de rodillos estriados Agromatic AG AQC 109 (Suiza). Luego las muestras fueron tamizadas mediante un tamiz N° 30 (595 μm), a fin de separar parcialmente el salvado. Se obtuvieron dos lotes de harina por cada variedad de sorgo acondicionado a diferente humedad (L, M y H).

Las muestras obtenidas fueron las siguientes:

- Harina de sorgo blanco proveniente de granos acondicionados a bajo (WS-RM-L), medio (WS-RM-M) y alto (WS-RM-H) contenido de humedad.
- Harina de sorgo Summer II (SII) proveniente de granos acondicionados a bajo (SII-RM-L), medio (SII-RM-M) y alto (SII-RM-H.) contenido de humedad.
- Harina de sorgo Gen 417 (SG) proveniente de granos acondicionados a bajo (SG-RM-L) medio (SG-RM-M) y alto (SG-RM-H) contenido de humedad.

La Figura 2.1 esquematiza los procedimientos de pulido y molienda realizados y las muestras codificadas obtenidas.

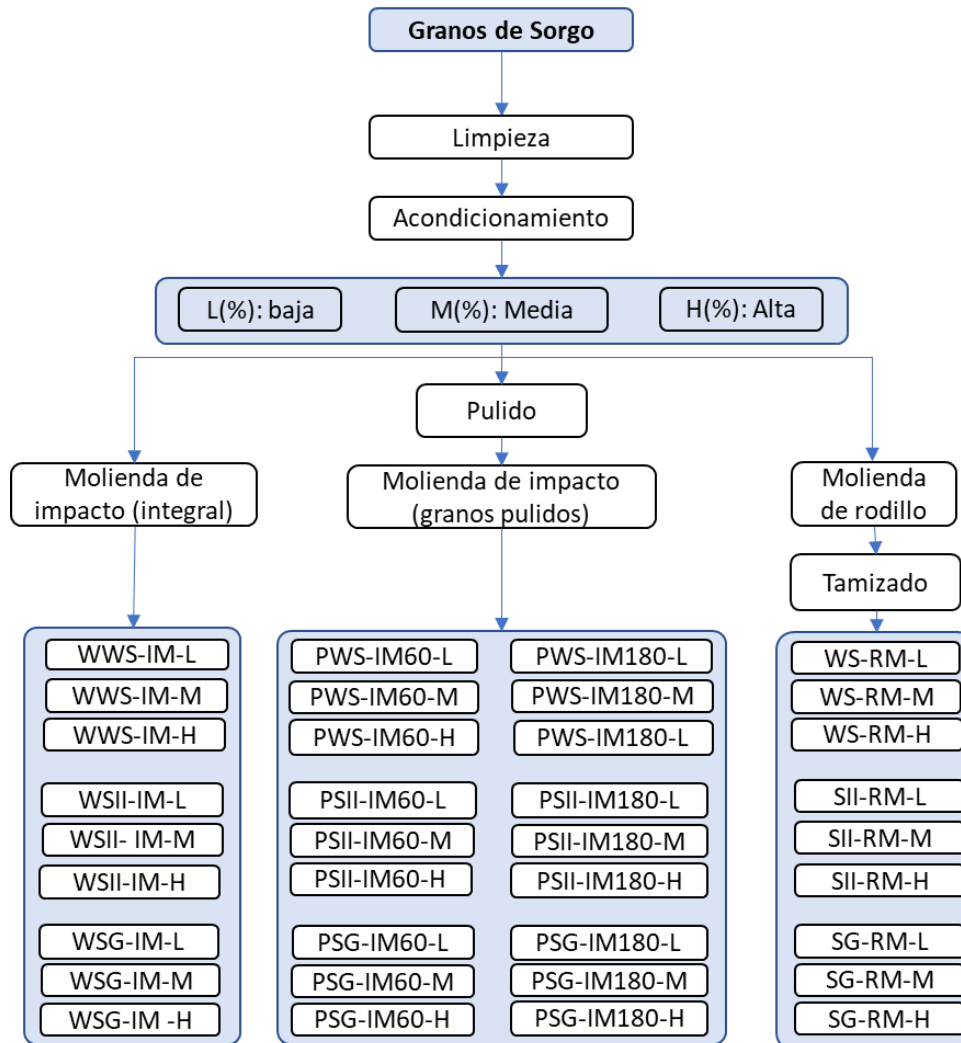


Figura 2.1. Esquema de los procesos de pulido y molienda realizados para la obtención de las muestras.

2.2.7 Determinación del rendimiento de molienda, contenido de humedad y cenizas

El rendimiento final del proceso fue calculado mediante la diferencia de peso de las muestras antes y después del pulido, para las harinas obtenidas por molienda de impacto. En el caso de las

harinas conseguidas por molienda de rodillos, el rendimiento final se calculó como la diferencia de peso antes y después del proceso de tamizado. Las determinaciones se realizaron por duplicado.

2.2.7.1 Humedad

El contenido de humedad de las harinas se determinó mediante diferencia de peso de la muestra antes y después de su calentamiento. Se pesaron 2 g de harina de cada muestra sobre placas de Petri y se mantuvieron en una estufa isotérmica de calentamiento eléctrico con circulación de aire por convección forzada a 130°C durante 2 horas hasta masa constante (Method 44-01, AACC 2010).

2.2.7.2 Cenizas

El contenido de cenizas de las harinas está relacionado con la cantidad total de minerales en la muestra. Se calculó por diferencia de peso de 2 g de harina, antes y después de calentar en mufla a 600 °C hasta masa constante (Method 08-10, AACC 2010).

2.2.8 Determinación del color de las harinas

El color de las diferentes muestras se determinó con un espectrofotómetro Minolta 508d (EUA) utilizando el sistema el sistema CieLab (Figura 2.2)(Caivano y Buera, 2012). Las magnitudes L^* , a^* y b^* son adimensionales y se definen en función del tipo de estímulo y del blanco de referencia a fin de simular a los observadores reales (Joshi y Brimelow, 2002).

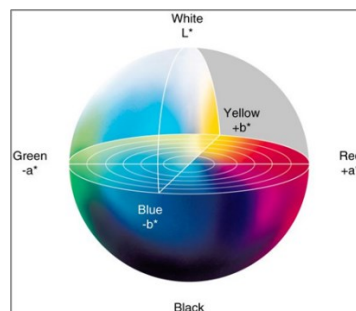


Figura 2.2. Escala de color CIE Lab

Para las determinaciones de los parámetros de color de las harinas de sorgo se colocaron aproximadamente 3 g de muestra sobre una superficie plana blanca, se cubrió con un vidrio de reflectancia, y se colocó el espectrofotómetro en el centro del vidrio para tomar las medidas. El procedimiento se realizó por triplicado.

2.2.9 Distribución de tamaño de partícula de las harinas

La determinación de la distribución del tamaño de partícula de las harinas se realizó mediante difracción láser con un analizador HORIBA LA 960, (USA), en medio seco (polvo).

Esta técnica consiste en medir el tamaño de las partículas por difracción de un haz de luz láser. Las partículas son expuestas a un rayo láser paralelo desviando la luz con un ángulo fijo, que depende de su tamaño, por ello el método se basa en que el ángulo de difracción es inversamente proporcional al tamaño de la partícula. La distribución de la intensidad de la luz dispersada se emplea para calcular la distribución del tamaño de un conjunto de partículas (Figura 2.3).

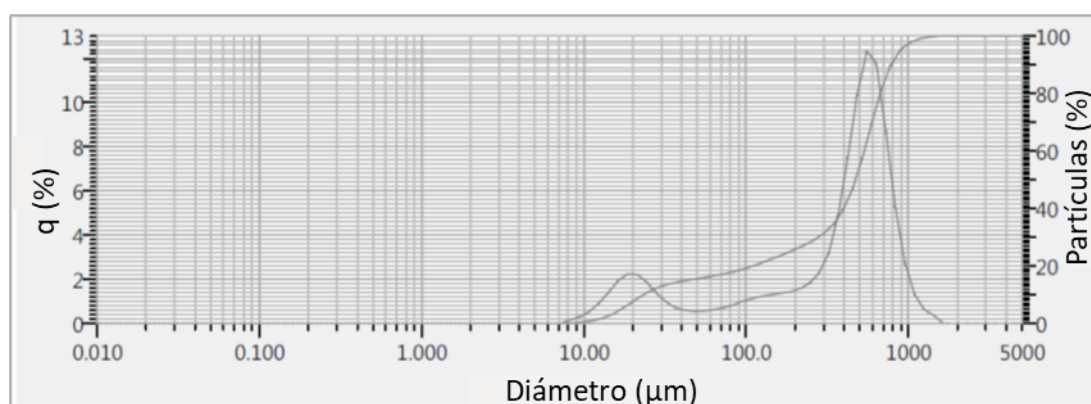


Figura 2.3. Ejemplo de un gráfico de distribución de tamaño de partículas.

Las muestras fueron previamente secadas en estufa por aproximadamente 60 min a 45°C hasta alcanzar una humedad entre 6 y 8% para lograr una mayor fluidez en el proceso de transporte mecánico. Para determinar el tamaño de las partículas, se utilizó un módulo de dispersión seca con un flujo de aire de 0,40 MPa y una velocidad de alimentación de 75. Se colocaron entre 13 ± 1 g de muestra en la tolva de alimentación y se midió el tamaño de las partículas cuando la transmitancia se encontró dentro de los parámetros establecidos. El procedimiento se repitió dos veces por cada muestra.

Esta metodología permite obtener el tamaño de partícula como el diámetro de una esfera teniendo el mismo volumen de la partícula. Se obtuvieron las curvas de fracción de volumen (volumen %) versus el diámetro ponderado por volumen de partícula. Se calcularon los siguientes parámetros de distribución de tamaño: el diámetro medio basado en volumen o diámetro medio de Brouckere (μm) ($D_{4,3}$) y los diámetros en los que el 10% (D_{10}), el 50% (D_{50}) y el 90% (D_{90}) de la población de partículas se encuentra por debajo de estos valores, respectivamente. Además, se obtuvo el índice de polidispersidad (Span) de la distribución de tamaños de partículas. Se calculó según la siguiente ecuación 2.3:

$$Span: \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (2.3)$$

2.2.10 Perfiles de viscosidad de las harinas

Las propiedades de *pasting* de las harinas de sorgo se determinaron utilizando un analizador de viscosidad rápida (RVA 4500, Perten Instruments, EUA). Se suspendieron 3,5 g de cada muestra (14% Humedad) en 25 g de agua destilada y se colocaron en recipientes de aluminio. Se utilizó el método general de *pasting* “standard Newport Scientific Method 1 (STD1)”. Las dispersiones se agitaron a 960 rpm durante 10 s, luego se incrementó la velocidad de agitación a 160 rpm hasta el final del ensayo. Inicialmente la temperatura de la suspensión se mantuvo a 50°C durante 1 min, luego se incrementó a 95°C en 5 min y se mantuvo durante 2,5 min más. Finalmente, se enfrió a 50°C en 3 min y se mantuvo a esta temperatura durante 2 min más. Durante el ensayo de *pasting* se registró la viscosidad y la temperatura de la suspensión en función del tiempo y, a partir de las curvas se obtuvieron los siguientes parámetros mediante el software ThermoLine para Windows (V 3.15, Perten Instruments, EUA): viscosidad máxima de pico (PV), viscosidad media (VM) y viscosidad final (VF). También se calcularon el “breakdown” (PV – VM) y el “setback” (VF – VM).

2.2.11 Diseño experimental y análisis de superficies respuestas

De manera complementaria, para evaluar el efecto de la humedad de acondicionamiento del grano y tiempo de pulido, y sus interacciones sobre las principales variables de respuesta en el proceso de molienda, se llevó a cabo un diseño de experimentos factorial. No se realizó para la molienda de rodillos debido a que solo se utilizó una variable de entrada (contenido de humedad). Todas las determinaciones fueron realizadas por duplicado. Se ajustaron polinomios cuadráticos o lineales para representar cada una de las respuestas (Y_n) en función de los factores del diseño (Ecuación 2.4).

El polinomio genérico ajustado a las diferentes respuestas fue el siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.4)$$

donde Y_i es la respuesta, β_0 es una constante, β_i simboliza los coeficientes de los parámetros lineales, β_{ii} representa los coeficientes de los parámetros cuadráticos, β_{ij} representa las constantes de la interacción entre parámetros y ε es el error aleatorio (Ferreira et al., 2007).

Se realizó un diseño experimental de 9 tratamientos en forma aleatoria y por duplicado, utilizando dos factores: tiempo de pulido y contenido de humedad y 3 niveles de cada uno. Los niveles de los factores fueron 0, 60 y 180 s para tiempo de pulido y bajo (~8%), medio (~12%) y alto (~16%) para humedad. Para cada variable respuesta se generó una ecuación lineal o cuadrática utilizando los términos significativos ($p < 0,05$). Basándose en esas ecuaciones, el comportamiento de las respuestas fue predicho dentro del área experimental y representado como una superficie de respuesta.

Las variables de respuestas utilizadas fueron: rendimiento de molienda (%), contenido de cenizas (%), viscosidad máxima (PV) por RVA y diámetro medio de partículas (D4,3).

Se realizó un análisis de varianza para examinar la significación estadística de los términos del modelo (Statgraphics plus 5.1, EUA). Se calculó el coeficiente de determinación (R^2) y la prueba de

falta de ajuste para establecer la adecuación de los modelos matemáticos para cada variable dependiente. Las ecuaciones de regresión múltiple para cada uno de los parámetros de respuesta evaluados se desarrollaron solo con los coeficientes significativos ($p < 0,05$). Para cada parámetro de calidad se generaron los gráficos de superficie de respuesta tridimensionales.

2.2.12 Análisis estadístico

Los datos fueron tratados estadísticamente por análisis de varianza (ANOVA). El análisis se realizó por bloques determinados por la variedad de sorgo, la humedad objetivo y la duración del pulido para la molienda de impacto, y la variedad y la humedad objetivo para la molienda con rodillos. Las medias fueron comparadas por la prueba LSD Fisher a un nivel de significancia de 0,05 ($p < 0,05$). Los coeficientes de correlación de Pearson (r) y el análisis multivariado (análisis de componentes principales, PCA) se realizaron utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2015). Todos los gráficos se obtuvieron utilizando los softwares Excel (Microsoft Office 365), Statgraphics plus 5.1 e InfoStat 2015.

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Dureza de los granos

Los granos pueden ser estudiados con relación a sus propiedades físicas como el tamaño del grano, la dureza, el peso de 1000 granos y la densidad relativa, entre otras. Una de las más relevantes es la dureza que está influenciada por las características del endospermo como también por las de la capa externa del grano (pericarpio). La microestructura del endospermo de sorgo ha sido documentada por varios investigadores (Delcour y Hoseney, 2010; Rooney y Murty, 1981; Taylor y Kruger, 2018). El endospermo amiláceo del sorgo se compone de regiones vítreas y harinosas que poseen microestructuras diferentes. Existe evidencia que los granos que presentan una alta proporción de endospermo harinoso poseen una menor densidad aparente. Mientras que los granos ricos en endospermo vítreo son más duros y durante la molienda se obtienen harinas con mayor proporción de partículas de mayor tamaño (Pedersen et al., 2000). A su vez la dureza del grano es importante durante la molienda ya que afectará la proporción de almidón dañado en la harina. Su presencia tiene estrecha relación con las propiedades reológicas de los sistemas ya que puede absorber hasta 10 veces de cantidad de agua respecto al almidón nativo (Barrera et al., 2013).

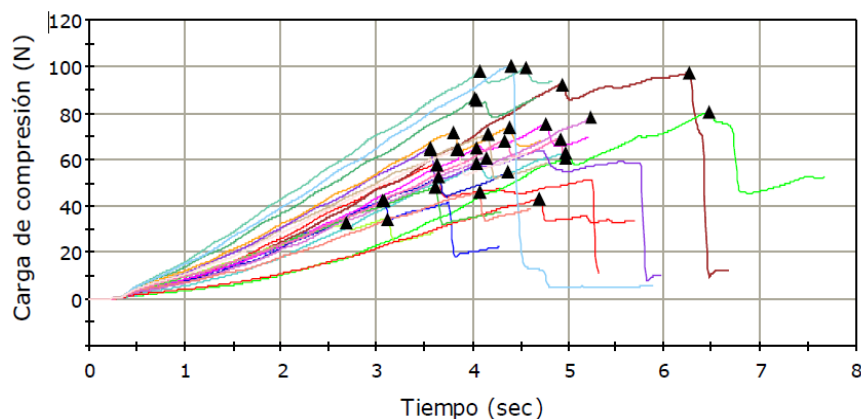


Figura 2.4. Curvas representativas del ensayo de fuerza o carga de compresión versus el tiempo de aplicación de granos de sorgo.

Los triángulos negros indican las fuerzas de compresión aplicadas hasta la ruptura de granos individuales. Cada repetición de la medición está representada por un color.

En la Figura 2.4 se muestran las curvas de fuerza o carga de compresión versus el tiempo de aplicación. Los granos presentaron una deformación elástica seguida de una región elástico-plástica hasta su ruptura. La deformación permanente de los granos durante el ensayo de compresión ocurrió en la región elástico-plástica de las curvas.

En cuanto a las propiedades mecánicas, la muestra SG 417 con menor contenido de humedad mostró la mayor dureza o fuerza máxima de ruptura (60 ± 7 N), mientras que WS y SII con alto contenido de humedad presentaron los valores más bajos (32 ± 7 N, en ambos casos) (Figura 2.5). De igual forma que (Zhao y Ambrose, 2017) encontramos que la resistencia del grano disminuyó a medida que aumentó el contenido de humedad, siendo esto significativamente evidente a mayores contenidos de humedad. Como señalaron estos autores, el acondicionamiento del grano a alta humedad aumenta su volumen debido al hinchamiento, ablanda el endospermo y endurece el salvado, lo que resulta en una menor fuerza de fractura.

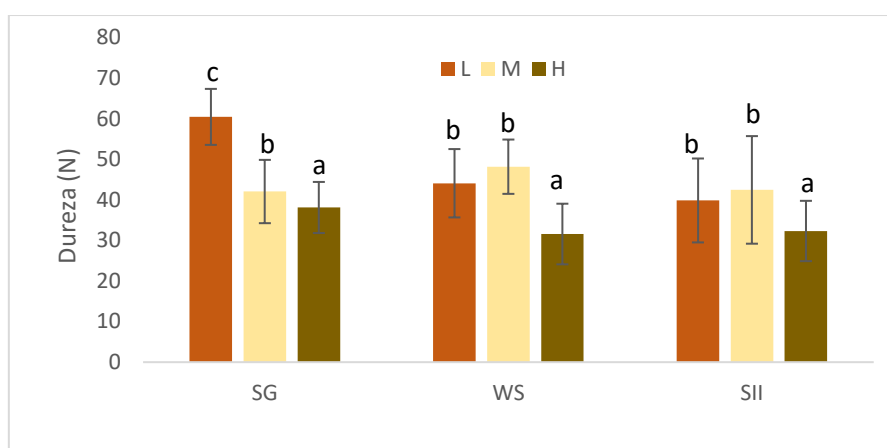


Figura 2.5. Textura de granos de sorgo acondicionados a tres humedades diferentes.

SG: sorgo Gen 417; WS: sorgo blanco; SII; sorgo Summer II; L: baja humedad; M: humedad media; H: alta humedad. Letras distintas entre columnas del mismo híbrido, indican valores significativamente diferentes ($p < 0,05$).

2.3.2 Efecto de la molienda sobre el rendimiento y el contenido de cenizas de las harinas

Los resultados del rendimiento de la molienda por rodillos se resumen en la Tabla 2.1. El contenido de humedad de los granos influyó significativamente en el rendimiento del proceso de molienda con rodillos. El rendimiento de molienda disminuyó significativamente ($p < 0,05$) a

medida que aumentó el contenido de humedad en los granos de sorgo de los tres híbridos de sorgos analizados. Los sorgos coloreados (SII y SG 417) presentaron rendimientos superiores al sorgo blanco (WS) en los tres niveles de humedad evaluados. El mayor rendimiento ($71,0 \pm 0,1\%$) fue obtenido por la molienda del sorgo SII a baja (L) humedad y los menores fueron para las harinas SG 417 ($48,0 \pm 0,2\%$) y WS ($49,7 \pm 1,5\%$), producidas a partir de granos acondicionados a alta humedad.

Un resultado similar al rendimiento más alto alcanzado en este trabajo por molienda con rodillos fue descrito por Rumler et al. (2021), para harina obtenida por molienda de rodillos y tamizado de granos de sorgo rojo (72%). Sin embargo, los autores no informaron si los granos fueron acondicionados antes de la molienda. Del mismo modo, Sakhare et al. (2014) reportaron menores rendimientos de harina mediante molienda con rodillos de granos de garbanzos verdes acondicionados a mayores contenidos de humedad.

El contenido de cenizas de las harinas disminuyó significativamente ($p < 0,05$) a medida que aumentó el contenido de humedad en las tres muestras de sorgo híbrido. Los resultados de la caracterización se muestran en la Tabla 2.1. El menor valor lo obtuvo la harina de sorgo blanco (WS-RM-H) acondicionada a alta humedad. El acondicionamiento aumenta la flexibilidad del salvado lo que evita que se muele produciendo pequeñas partículas y facilita su separación. También ablanda el endospermo, permitiéndole romperse con menos fuerza. En consecuencia, el proceso de acondicionamiento permite equilibrar el nivel de extracción de harina con un contenido de salvado aceptable (Hook et al., 1982). Teniendo en cuenta el rendimiento de las harinas y el contenido de cenizas, se sugiere que un alto contenido de humedad no sólo produce una mayor separación del salvado y el endospermo, sino también que el salvado arrastra parte del endospermo, lo que explica los bajos rendimientos de harina.

En cuanto a las muestras producidas por pulido y molienda de impacto, el primero de los procesos disminuyó el rendimiento de harina y su contenido de cenizas (Tabla 2.1). El mayor rendimiento se obtuvo con granos SG 417 acondicionados a baja humedad después de 60 s y 180 s de pulido. Contrariamente, el sorgo SII exhibió los rendimientos más bajos. De manera similar, van der Merwe et al. (2005) obtuvo harinas mediante pulido de granos de sorgo (veinticuatro cultivares de sorgo) previamente a su molienda, y los rendimientos se encontraron entre 70% y 90%. También informaron que los rendimientos más bajos (71,7% a 84,4%) fueron obtenidos en

harina de sorgo mediante molienda de rodillos y tamizado en lugar de pulido previo para eliminar el salvado.

Tabla 2.1. Caracterización de las harinas obtenidas por molienda de impacto y de rodillos.

	Humedad	Pulido (s)	Rendimiento de Molienda (%)	Cenizas (%)	
Gen 417	Bajo	-	100 ^c	1,40 ^c	Molienda por Impacto
		60	88,60 ^b	0,90 ^b	
		180	78,02 ^a	0,62 ^a	
	Medio	-	100 ^c	1,43 ^c	
		60	81,4 ^b	0,86 ^b	
		180	65,4 ^a	0,48 ^a	
	Alto	-	100 ^c	1,37 ^c	
		60	86,7 ^b	1,09 ^b	
		180	69,1 ^a	0,52 ^a	
Blanco	Bajo	-	100 ^c	1,38 ^c	Molienda por Impacto
		60	84,5 ^b	0,77 ^b	
		180	75,4 ^a	0,44 ^a	
	Medio	-	100 ^c	1,43 ^c	
		60	84,6 ^b	0,83 ^b	
		180	70,5 ^a	0,54 ^a	
	Alto	-	100 ^c	1,31 ^c	
		60	78,1 ^b	0,75 ^b	
		180	68,7 ^a	0,54 ^a	
Summer II	Bajo	-	100 ^c	1,51 ^c	Molienda por Impacto
		60	82,6 ^b	1,01 ^b	
		180	71,6 ^a	0,76 ^a	
	Medio	-	100 ^c	1,47 ^c	
		60	77,4 ^b	0,98 ^b	
		180	56,9 ^a	0,66 ^a	
	Alto	-	100 ^c	1,53 ^c	
		60	65,8 ^b	0,71 ^b	
		180	47,2 ^a	0,47 ^a	
Gen 417	Bajo	-	67,9 ^b	1,07 ^c	Molienda por rodillos
	Medio	-	52,0 ^a	0,75 ^b	
	Alto	-	48,0 ^a	0,64 ^a	
Blanco	Bajo	-	60,5 ^b	1,09 ^c	
	Medio	-	50,6 ^a	0,71 ^b	
	Alto	-	49,7 ^a	0,42 ^a	
Summer II	Bajo	-	71,0 ^c	1,06 ^c	
	Medio	-	60,7 ^b	0,77 ^b	
	Alto	-	55,8 ^a	0,46 ^a	

Los valores se expresan como media (n=2). Letras diferentes en la misma columna, entre muestras del mismo híbrido de sorgo (molino de rodillos) y condición de humedad (molino de impacto), indican valores significativamente diferentes (p<0,05).

En el presente estudio, el nivel de cenizas de las harinas parcialmente refinadas disminuyó a medida que aumentó el tiempo de pulido y el contenido de humedad. A su vez, la harina de sorgo blanco (WS) mostró el menor contenido de cenizas a alta humedad y 180 s de tiempo de pulido, mientras que el valor más alto fue para SG 417 a baja humedad y 60 s de tiempo de pulido. Galán et al. (2018) también informaron una disminución en los contenidos de cenizas en harinas de sorgo (blancos y rojos) a medida que aumentaron el tiempo de pulido de los granos.

Era esperable que los diferentes procesos de molienda evaluados en este estudio conduzcan a diferentes rendimientos y contenidos de cenizas en las harinas, según el híbrido utilizado y el acondicionamiento previo realizado a los granos. En este sentido es interesante destacar que el tamaño de los granos fue diferente lo que puede haber afectado su paso a través de los equipos de pulido y molienda. La molienda de rodillos industrial se produce en forma gradual, en los primeros pasos ocurre la rotura del grano y poca harina, lo que permite eliminar el endospermo de las partes más gruesas del grano. Luego, la distancia entre los rodillos disminuye, lo que resulta en la reducción del tamaño de las partículas de endospermo (Rumler et al., 2021). En cuanto al molino de impacto, la remoción del salvado se realiza únicamente en la etapa de abrasión; por lo tanto, la principal influencia en el rendimiento del proceso y, de hecho, en el contenido de cenizas, es el tiempo de pulido. Por tanto, el contenido de humedad no parece ser demasiado relevante en los resultados de estos parámetros.

2.3.3 Distribución de tamaño de partículas de la harina (PSD)

El tamaño de partículas que conforman la harina es un parámetro importante ya que influencia principalmente las propiedades de viscosidad y velocidad de absorción de agua, lo que puede ejercer un efecto significativo en la calidad de los productos elaborados (Dhen et al., 2016; Moiraghi et al., 2013). En la Figura 2.6 se exponen los patrones de PSD obtenidos mediante molienda con rodillos. Todas las muestras mostraron una distribución de partículas bimodal. Evidenciaron un pico grande y ancho con un máximo alrededor de 600 μm de diámetro lo que sugiere la presencia de partículas que incluyen trozos de endospermo y fracciones de salvado. Las muestras también exhibieron un

pequeño pico de alrededor de 25 μm de diámetro, relacionado con la fracción de gránulos de almidón que normalmente varían entre los 2 y 30 μm (Rooney y Murty, 1981).

Tabla 2.2. Determinación del tamaño de partículas

	Humedad	Pulido (s)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	D4,3 (μm)	Span	
Gen 417	Bajo	-	17,9 ^a	270,8 ^a	697,6 ^a	317,3 ^a	2,1 ^c	Molienda por Impacto
		60	27,8 ^a	499,3 ^b	830,5 ^b	476,9 ^b	1,7 ^b	
		180	65,2 ^b	518,9 ^b	795,8 ^a	497,2 ^b	1,5 ^a	
	Medio	-	24,3 ^c	490,2 ^c	853,8 ^b	474,7 ^c	1,7 ^a	
		60	20,0 ^b	457,9 ^a	779,4 ^a	425,4 ^a	1,8 ^a	
		180	23,3 ^a	473,4 ^b	791,6 ^a	444,6 ^b	1,7 ^a	
	Alto	-	22,0 ^a	461,0 ^a	797,7 ^a	425,1 ^a	1,8 ^a	
		60	21,6 ^a	439,3 ^a	786,3 ^a	420,3 ^a	1,8 ^a	
		180	22,1 ^a	439,1 ^a	786,4 ^a	423,6 ^a	1,8 ^a	
Blanco	Bajo	-	22,2 ^a	474,7 ^a	833,6 ^a	453,3 ^a	1,8 ^c	Molienda por Impacto
		60	31,4 ^b	512,4 ^{ab}	819,5 ^a	484,3 ^{ab}	1,6 ^b	
		180	94,4 ^c	564,2 ^b	888,5 ^a	550,4 ^b	1,4 ^a	
	Medio	-	37,7 ^a	585,4 ^a	964,0 ^a	571,2 ^a	1,6 ^b	
		60	36,9 ^a	575,0 ^a	895,1 ^a	548,0 ^a	1,6 ^b	
		180	132,4 ^b	581,5 ^a	886,2 ^a	566,6 ^a	1,3 ^a	
	Alto	-	30,3 ^a	437,8 ^a	786,5 ^a	431,5 ^a	1,8 ^b	
		60	37,5 ^a	501,6 ^{ab}	793,5 ^a	479,7 ^{ab}	1,6 ^b	
		180	187,6 ^b	564,7 ^b	883,6 ^b	561,6 ^b	1,2 ^a	
Summer II	Bajo	-	19,7 ^{ab}	476,8 ^a	861,3 ^a	459,2 ^a	1,8 ^b	Molienda por rodillos
		60	17,9 ^{ab}	516,4 ^a	852,8 ^a	459,8 ^a	1,8 ^b	
		180	21,3 ^b	531,9 ^b	854,4 ^a	492,0 ^a	1,7 ^a	
	Medio	-	20,1 ^a	441,8 ^a	776,4 ^a	416,9 ^a	1,8 ^b	
		60	22,3 ^{ab}	518,5 ^b	789,7 ^a	468,9 ^{ab}	1,6 ^a	
		180	25,0 ^b	530,3 ^b	834,0 ^a	494,2 ^b	1,6 ^a	
	Alto	-	23,8 ^a	469,7 ^a	801,6 ^a	449,2 ^a	1,7 ^b	
		60	23,6 ^a	470,8 ^a	799,8 ^a	448,2 ^a	1,7 ^b	
		180	90,5 ^b	525,2 ^a	825,9 ^a	508,3 ^a	1,4 ^a	
Gen 417	Bajo	-	117,8 ^b	490,6 ^b	803,9 ^b	485,9 ^b	1,4 ^a	Molienda por rodillos
	Medio	-	103,7 ^a	469,5 ^a	799,2 ^a	466,6 ^a	1,5 ^a	
	Alto	-	84,7 ^a	417,4 ^a	766,8 ^a	426,1 ^a	1,6 ^a	
Blanco	Bajo	-	170,2 ^a	522,3 ^a	849,8 ^a	525,5 ^a	1,3 ^a	Molienda por rodillos
	Medio	-	204,8 ^a	525,9 ^a	847,2 ^a	533,7 ^a	1,2 ^a	
	Alto	-	156,3 ^a	456,7 ^a	777,7 ^a	468,7 ^a	1,4 ^a	
Summer II	Bajo	-	72,0 ^b	462,1 ^b	808,9 ^b	459,4 ^b	1,4 ^a	Molienda por rodillos
	Medio	-	69,3 ^b	458,2 ^b	788,3 ^b	452,5 ^b	1,6 ^a	
	Alto	-	52,2 ^a	384,8 ^a	716,4 ^a	391,9 ^a	1,7 ^a	

Los valores se expresan como medias ($n=2$). Valores seguidos de letras diferentes en la misma columna, entre muestras del mismo híbrido de sorgo (molino de rodillos) y condición de humedad (molino de impacto), son significativamente diferentes ($p<0,05$). D4,3: diámetro medio basado en volumen D10, D50, D90: diámetros donde el 10%, 50% y 90%

de la población de partículas se encuentran por debajo de estos valores, respectivamente. Span: índice de polidispersidad.

El diámetro medio basado en volumen ($D_{4,3}$) de las muestras osciló entre $391,9 \mu\text{m}$ y $533,7 \mu\text{m}$ (Tabla 2.2). Este parámetro disminuyó gradualmente con la humedad de los granos. En todas las muestras, el diámetro del 90% de las partículas (D_{90}) se encontró por debajo de los $849,8 \mu\text{m}$, y este valor también disminuyó con el aumento de la humedad de los granos. El índice de polidispersidad (Span) de la distribución, indica el grado de dispersión de tamaños de partícula, no varió significativamente con las condiciones de molienda. Las muestras presentaron un hombro de aproximadamente $200 \mu\text{m}$, característico de este tipo de molienda que produce partículas de tamaño variable (Kiryluk et al., 2000).

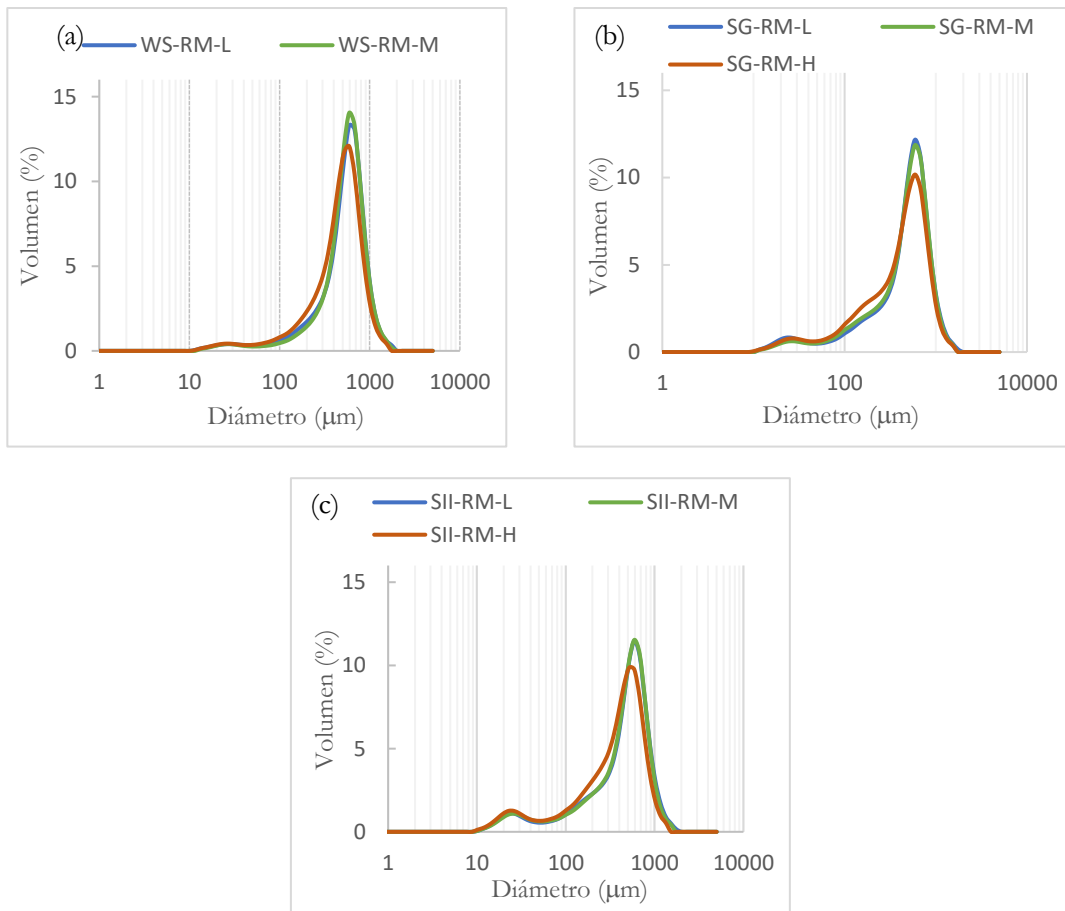


Figura 2.6. Distribución de tamaño de partículas de harinas se sorgo blanco (a), sorgo Gen (b) y sorgo Summer II (c) obtenidas mediante molienda por rodillos.

El patrón general de PSD de las harinas obtenidas por pulido y molienda por impacto fue similar en las muestras analizadas. La Figura 2.7 muestra los PSD de las harinas de sorgo blanco (a, b, c), Gen (c, d, e) y Sumer II (f, g, h) acondicionados a humedad baja, media y alta, respectivamente. Todas las partículas de harina de sorgo obtenidas por molidas por impacto presentaron una distribución bimodal con un pico pequeño de alrededor de 25 μm y uno grande de alrededor de 500 μm . Al-Rabadi (2013) reportó un valor similar a los obtenidos en este estudio de $D_{4,3}$ ($525 \pm 20 \mu\text{m}$) para harina de sorgo obtenida por molienda de impacto.

En todas las muestras, el diámetro del 90% de las partículas (D_{90}) se encontró por debajo de 963,9 μm (Tabla 2.2). El diámetro medio basado en volumen ($D_{4,3}$) estuvo en el rango de 317,3 μm y 566,6 μm y no se encontró una tendencia clara con las humedades de los granos. El máximo valor de span fue 2,1 (WSG-IM-L), mientras que el más bajo fue 1,2 (PWS-IM180-H), lo que indica que las harinas presentaron una amplia distribución de tamaño de partículas. Los valores de span disminuyeron con el grado de refinamiento de la harina (Tabla 2.2), siendo mayores para harinas integrales y menores para aquellas con 180 s de pulido. Este resultado puede atribuirse a la alta cantidad de partículas de salvado en muestra integrales. De acuerdo a Zhao y Ambrose (2018) la fracción de salvado del grano de sorgo posee una textura más flexible y resistente (en comparación con el endospermo), que con el incremento de la humedad se endurece, lo que dificulta su proceso de molienda.

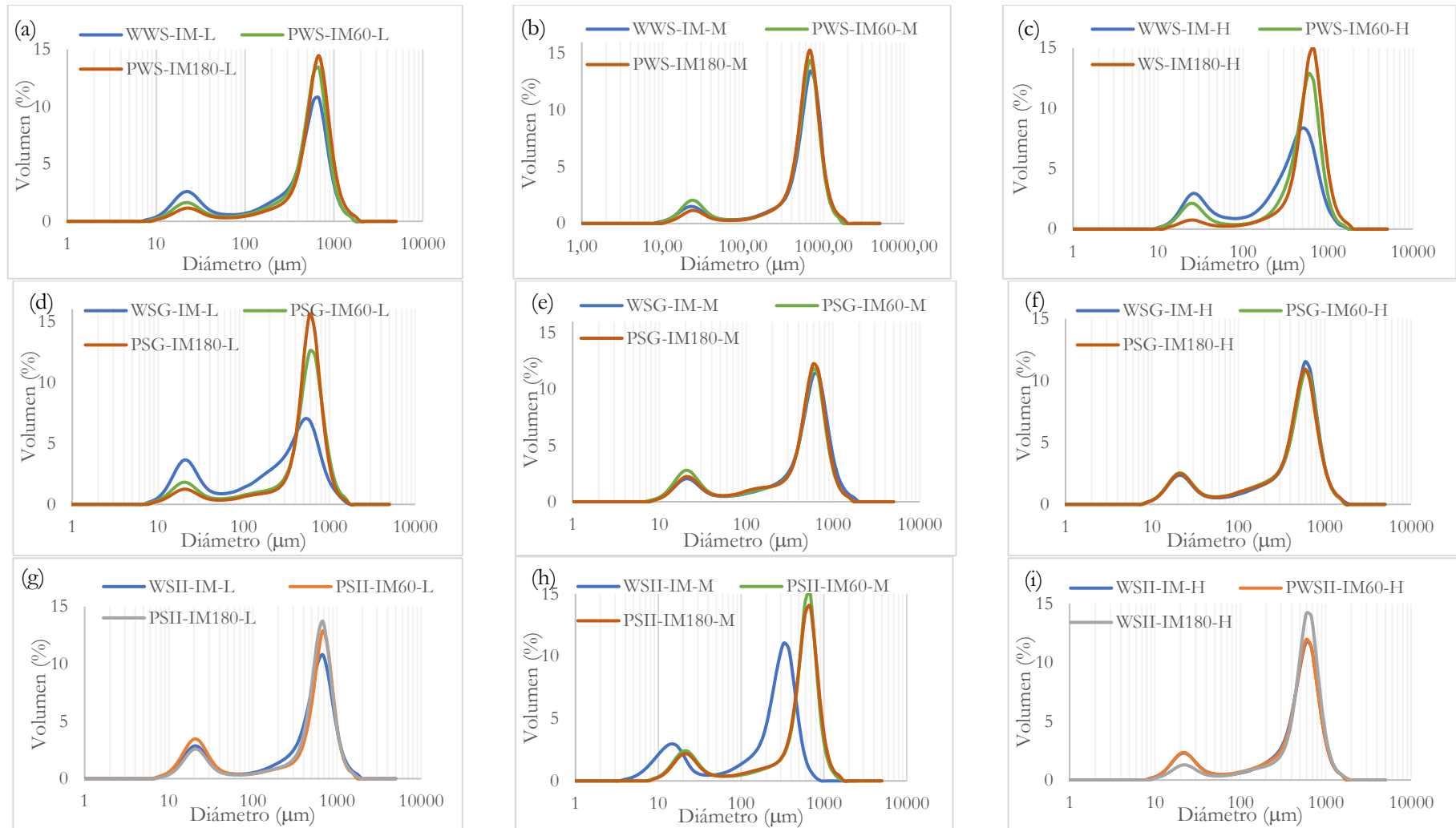


Figura 2.7. Distribución de tamaño de partículas de harinas obtenidas mediante molienda por impacto en sorgo blanco (a, b, c), sorgo Gen 417 (d, e y f) y sorgo Summer II (g, h, i).

2.3.4 Propiedades de *pasting* de las harinas

Las propiedades de viscosidad se determinaron a través de un Viscoanalizador Rápido (RVA). Durante este ensayo una dispersión de harina en agua es calentada, enfriada y sometida a agitación constante (fuerza de corte) bajo condiciones controladas, y se analizan los cambios de viscosidad del sistema en función del tiempo y la temperatura, lo que permite estudiar el proceso de gelatinización y gelificación del almidón.

Los perfiles de viscosidad de las muestras molidas con rodillos fueron influenciados por el contenido de humedad de los granos de sorgo acondicionados previamente (Tabla 2.3). En general, las muestras acondicionadas a un alto contenido de humedad alcanzaron mayor viscosidad de *pasting* que las acondicionadas a humedad media y baja. Los resultados mostraron que, en todos los tipos de harinas, los valores de viscosidad máxima (PV) y final (FV) aumentaron significativamente a medida que aumentaba el contenido de humedad de los granos (Tabla 2.3). Las muestras acondicionadas a humedad alta permitieron una mayor eliminación de sus capas externas, con el consiguiente incremento de la proporción de almidón disponible. La alta viscosidad de *pasting* es deseable en la elaboración de productos horneados sin gluten, como pasteles y pan, debido a una mejor retención de burbujas de aire y CO₂ (Ronda et al., 2015).

La temperatura de *pasting* (PT) disminuyó a medida que aumentó el contenido de humedad. La PT indica la temperatura mínima necesaria el inicio del proceso de *pasting* y está directamente asociada con las necesidades energéticas del proceso (Prabhakaran y Moses, 2016). La tendencia de los gránulos de almidón gelatinizados a la desintegración (BD) y la de las moléculas de amilosa a retrogradar durante el enfriamiento de la pasta (SB), pueden ser determinadas mediante el análisis de las curvas de *pasting* (Beta y Corke, 2001). El BD del almidón no mostró diferencias significativas en la mayoría de las muestras, lo que indicó que las condiciones de pulido y humedad no afectaron el nivel de fragmentación después de la viscosidad máxima. Los valores de SB mostraron una ligera variación entre los mismos tipos de harina de sorgo con diferentes contenidos de humedad.

Tabla 2.3. Propiedades de pasting de las harinas

	Humedad	Pulido (s)	PV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)	
Gen 417	Bajo	-	1303 ^a	260 ^a	1994 ^a	981 ^a	84 ^a	Molienda por Impacto
		60	1600 ^b	339 ^a	2471 ^{ab}	1210 ^a	80 ^a	
		180	1882 ^b	362 ^a	2946 ^b	1426 ^a	77 ^a	
	Medio	-	1198 ^a	162 ^a	1974 ^a	1063 ^a	86 ^a	
		60	1926 ^b	429 ^b	2885 ^b	1388 ^a	82 ^a	
		180	2126 ^b	430 ^b	3071 ^b	1375 ^a	79 ^a	
	Alto	-	1280 ^a	236 ^a	2248 ^a	1104 ^a	88 ^a	
		60	1437 ^a	245 ^a	2282 ^a	1091 ^a	85 ^a	
		180	1710 ^b	288 ^a	2702 ^a	1279 ^a	84 ^a	
Blanco	Bajo	-	959 ^a	35 ^a	2559 ^a	1635 ^b	89 ^b	
		60	1273 ^b	43 ^a	2662 ^a	1432 ^a	87 ^a	
		180	1439 ^c	67 ^a	2858 ^b	1486 ^a	87 ^a	
	Medio	-	959 ^a	52 ^a	2553 ^a	1646 ^b	89 ^b	
		60	1216 ^b	46 ^a	2601 ^a	1431 ^a	88 ^a	
		180	1368 ^c	78 ^a	2706 ^b	1416 ^a	87 ^a	
	Alto	-	1304 ^a	76 ^b	2810 ^a	1422 ^a	88 ^a	
		60	1453 ^b	72 ^b	2831 ^a	1449 ^a	88 ^a	
		180	1503 ^b	47 ^a	2933 ^a	1478 ^a	87 ^a	
Summer II	Bajo	-	1548 ^a	276 ^a	2663 ^a	1391 ^a	86 ^c	
		60	1919 ^b	460 ^b	2984 ^b	1524 ^b	78 ^b	
		180	2227 ^c	498 ^b	3349 ^c	1620 ^b	76 ^a	
	Medio	-	1728 ^a	320 ^a	3035 ^a	1627 ^a	78 ^a	
		60	2215 ^b	560 ^a	3456 ^a	1801 ^a	65 ^a	
		180	2259 ^b	520 ^a	3416 ^a	1677 ^a	77 ^a	
	Alto	-	1748 ^a	327 ^a	2847 ^a	1426 ^a	86 ^c	
		60	2478 ^b	521 ^b	3676 ^b	1718 ^b	79 ^b	
		180	2733 ^c	697 ^c	3728 ^b	1692 ^b	75 ^a	
Gen 417	Bajo	-	1873 ^a	317 ^a	2813 ^a	1257 ^a	85 ^c	Molienda por rodillos
	Medio	-	2607 ^b	549 ^b	3499 ^b	1441 ^b	82 ^b	
	Alto	-	2918 ^c	505 ^c	3868 ^c	1455 ^b	79 ^a	
Blanco	Bajo	-	1619 ^a	66 ^a	2982 ^a	1429 ^a	89 ^c	
	Medio	-	2047 ^b	181 ^b	3379 ^b	1513 ^b	81 ^a	
	Alto	-	2489 ^c	418 ^c	3739 ^c	1433 ^a	87 ^b	
Summer II	Bajo	-	2190 ^a	448 ^a	3014 ^a	1271 ^a	77 ^b	
	Medio	-	2653 ^b	617 ^b	3528 ^b	1492 ^a	77 ^b	
	Alto	-	2972 ^c	747 ^b	3794 ^c	1570 ^b	76 ^a	

Los valores se expresan como medias (n=2). Valores seguidos de letras diferentes en la misma columna, entre muestras del mismo híbrido de sorgo (molino de rodillos) y condición de humedad (molino de impacto), son significativamente diferentes (p<0,05). PV: pico de viscosidad; BD: viscosidad de ruptura; FV: viscosidad final; SB: retrogradación; PT: temperatura pico.

Por otra parte, el perfil de *pasting* de las harinas de sorgo obtenidas mediante molienda por impacto fue afectado significativamente por el proceso de pulido. El pico de viscosidad (PV) y la viscosidad final (FV) aumentaron con el grado de refinamiento siendo máximos en las muestras obtenidas luego de 180 s de pulido de los granos (Tabla 2.3), lo que se atribuyó a un aumento en la proporción de almidón disponible para la gelatinización como se describió anteriormente. La muestra PSII-IM180-H mostró un valor significativamente más alto de PV y BD, lo cual indica que los gránulos se hincharon en mayor proporción durante el calentamiento y, en consecuencia, tuvieron un mayor grado de debilidad y ruptura luego del pico de viscosidad. Resultados similares fueron descritos por Yetneberk et al. (2005) al analizar los perfiles de *pasting* de sorgos altos en taninos sometidos a diferentes niveles de abrasión. Estos autores observaron una relación directa entre PV y FV con el porcentaje de abrasión del grano, que lo relacionaron con la disminución de componentes capaces de inhibir la hinchazón del almidón, y al aumento en el contenido de almidón de la harina como resultado de la eliminación progresiva del salvado. La Figura 2.8 muestra los perfiles de *pasting* de las harinas.

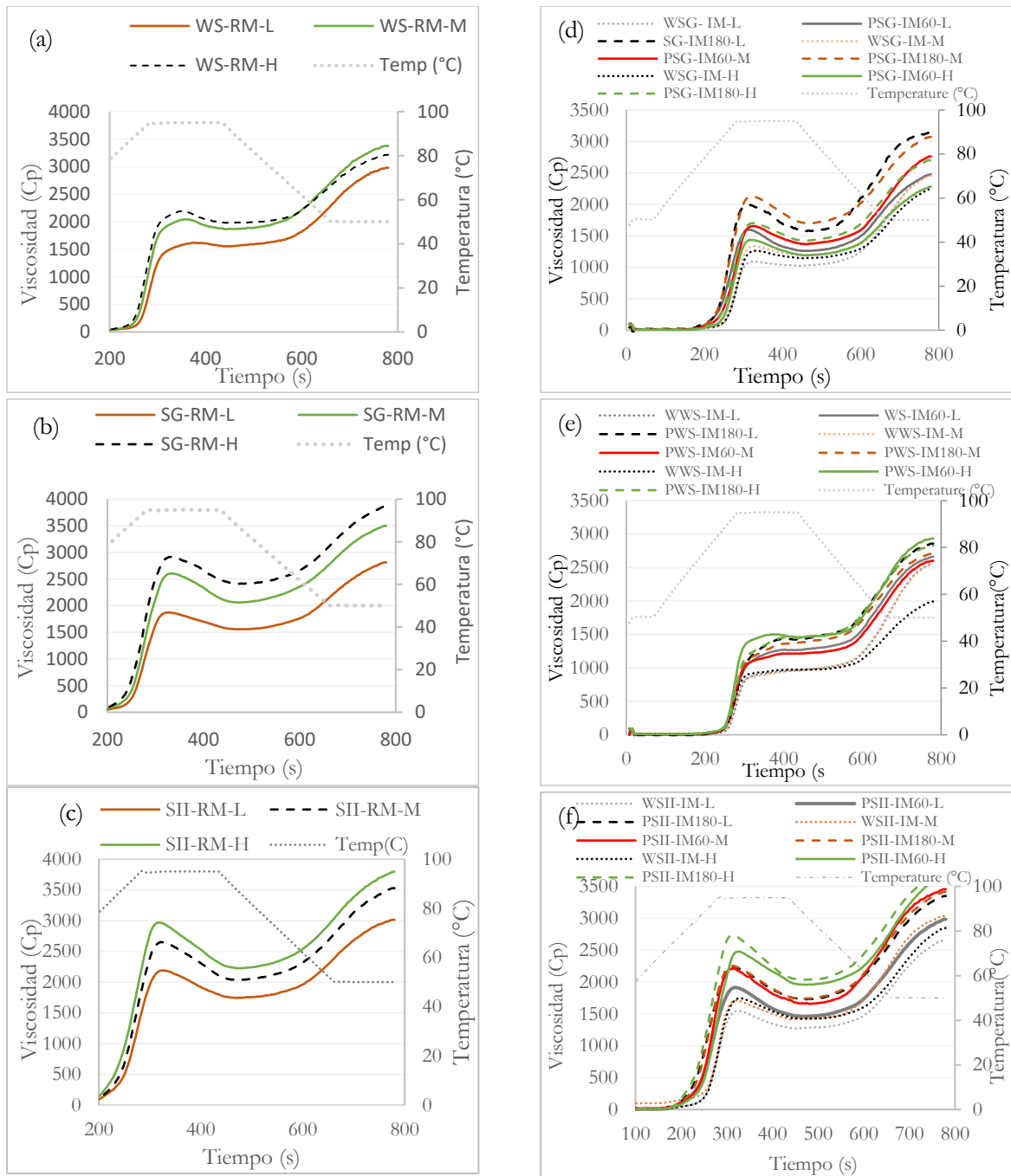


Figura 2.8. Perfiles de viscosidad de harinas de sorgo molidas por rodillos (a, b, c) e impacto (d, e, f).

W: Integral; SG: sorgo Gen 417; WS: sorgo blanco; SII: sorgo Summer II; IM: Molino de Impacto; RM: Molino de Rodillos; L: humedad baja; M: humedad media; H: humedad alta; 60: 60 s de pulido; 180: 180 s de pulido.

2.3.5 Color de las harinas

La harina de sorgo blanco obtenida por molienda de rodillos (WS-RM) (Tabla 2.4) mostró los valores más altos de Luminosidad (L^*), indicando una harina más blanca que las obtenidas a partir de granos marrones, como era de esperar. Por otro lado, L^* aumentó progresivamente a medida que incrementó el contenido de humedad de todas las harinas de sorgo ($p < 0,05$). El sorgo blanco y el sorgo SII acondicionados a alta humedad mostraron los valores más altos de L^* . Para todos los tipos de harina de sorgo, el parámetro a^* , relacionado con el color rojo, aumentó significativamente ($p < 0,05$) a medida que disminuyó el contenido de humedad (Tabla 2.4) Estos resultados indicaron que el nivel de pigmentos rojos está relacionado a las capas externas de granos que se eliminan más fácilmente con un alto contenido de humedad (Rumler et al., 2021). Sin embargo, el parámetro b^* , relacionado el color amarillo, fue determinado principalmente por el tipo de sorgo, siendo mayor para harinas de sorgo blanco. Las muestras de harinas de sorgo molidas con rodillos exhibieron una mayor contaminación por salvado en comparación con las producidas por pulido y molienda de impacto, como lo demuestra el mayor contenido de cenizas y la luminosidad (L^*).

Con respecto a las muestras pulidas y molidas por impacto, L^* aumentó como consecuencia de la disminución de las capas externas (Tabla 2.4). Los valores máximos de L^* se obtuvieron a los 180 s de pulido. Tanto la harina de sorgo blanco integral como la de sorgo blanco pulido durante 60 s mostraron valores de L^* más altos que los de la harina SG 417 y SII a todos los contenidos de humedad evaluados. Como era de esperar, L^* presentó correlaciones negativas con el rendimiento de harina ($r = -0,64$, $p < 0,005$) y el contenido de cenizas ($r = -0,79$, $p < 0,0001$). El parámetro a^* disminuyó a medida que aumentó el tiempo de pulido. La harina de sorgo SII obtuvo los valores más bajos de a^* , a pesar de ser un grano de color marrón/rojizo. Esto podría estar relacionado con una reducción más efectiva de las capas externas que los otros granos de sorgo debido a su textura más blanda (Figura 2.5). El parámetro b^* no mostró ninguna tendencia con el tiempo de pulido y contenido de humedad, y estuvo relacionado principalmente por el tipo de sorgo al igual que lo observado en la molienda por rodillos y en concordancia con Buitimea-Cantúa et al. (2013).

Tabla 2.4. Parámetros de color de las harinas

	Humedad	Pulido (s)	L*	a*	b*	
Gen	Bajo	-	67,6 ^a	5,1 ^c	12,7 ^a	Molienda por Impacto
		60	71,0 ^b	4,6 ^b	12,6 ^a	
		180	75,7 ^c	3,7 ^a	12,3 ^a	
	Medio	-	66,5 ^a	5,1 ^b	12,6 ^a	
		60	68,6 ^b	5,1 ^b	12,3 ^a	
		180	80,6 ^c	2,7 ^a	11,7 ^a	
	Alto	-	65,0 ^a	5,5 ^b	12,7 ^b	
		60	69,0 ^b	5,0 ^b	12,9 ^b	
		180	74,3 ^c	4,1 ^a	12,0 ^a	
Blanco	Bajo	-	77,9 ^a	1,6 ^c	15,5 ^a	
		60	84,5 ^b	0,7 ^b	15,1 ^a	
		180	87,6 ^c	0,3 ^a	16,7 ^a	
	Medio	-	77,3 ^a	1,7 ^c	15,6 ^b	
		60	84,7 ^b	0,8 ^b	14,6 ^a	
		180	87,0 ^c	0,4 ^a	15,7 ^b	
	Alto	-	76,7 ^a	1,7 ^b	15,8 ^a	
		60	84,1 ^b	0,9 ^a	15,0 ^a	
		180	84,9 ^b	0,8 ^a	16,4 ^a	
Summer II	Bajo	-	71,2 ^a	4,7 ^c	11,2 ^a	
		60	76,7 ^b	3,8 ^b	10,5 ^a	
		180	82,7 ^c	2,4 ^a	10,4 ^a	
	Medio	-	69,8 ^a	4,5 ^c	11,1 ^b	
		60	77,7 ^b	3,3 ^b	11,0 ^b	
		180	83,2 ^c	2,2 ^a	10,3 ^a	
	Alto	-	69,4 ^a	4,5 ^c	11,5 ^b	
		60	75,5 ^b	3,3 ^b	11,0 ^a	
		180	80,8 ^c	2,4 ^a	10,5 ^a	
Gen	Bajo	-	65,5 ^a	4,9 ^b	11,9 ^a	Molienda por rodillos
	Medio	-	72,3 ^b	3,2 ^a	10,7 ^a	
	Alto	-	81,1 ^c	1,7 ^a	10,8 ^a	
Blanco	Bajo	-	77,1 ^a	1,4 ^b	15,4 ^b	
	Medio	-	79,8 ^b	1,5 ^b	16,4 ^c	
	Alto	-	84,3 ^c	0,9 ^a	14,6 ^a	
Summer II	Bajo	-	73,3 ^a	2,7 ^c	9,2 ^a	
	Medio	-	77,5 ^b	1,9 ^b	8,8 ^a	
	Alto	-	84,7 ^c	1,1 ^a	10,0 ^b	

Los valores se expresan como media (n=2). Valores seguidos de letras diferentes en la misma columna, entre muestras del mismo híbrido de sorgo (molino de rodillos) y condición de humedad (molino de impacto), son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

2.3.6 Análisis de la combinación de variables de molienda

Con el objetivo de mejorar la capacidad de predicción del efecto de las condiciones de pulido y molienda, sobre los parámetros más relevantes de calidad de las harinas, se ajustaron polinomios cuadráticos o lineales para representar cada una de las respuestas (Y_n) en función de los factores del diseño. Los coeficientes de regresión y determinación de los modelos se muestran en la Tabla 2.5 y las superficies de respuesta correspondientes en las Figura 2.9 y Figura 2.10.

El efecto de la humedad y el tiempo de pulido sobre el rendimiento de molienda (RM) para sorgo blanco mostró un ajuste significativo del modelo (Tabla 2.5). El porcentaje de variabilidad de la respuesta en el modelo arrojado, R^2 , fue de 97,56% y una falta de ajuste no significativa. La humedad y el tiempo de pulido tuvieron un efecto lineal positivo y negativo, respectivamente, sobre el RM% y no se observaron efectos cuadráticos ni interacciones significativas. A largos tiempos de pulido se elimina una mayor proporción de la cubierta externa del grano, con la consecuente disminución del RM%. Por otro lado, los sorgos coloreados, SII y SG 417 mostraron R^2 altos pero las pruebas de Durbin-Watson y la de falta de ajuste mostraron p-valores significativos por lo que se concluyó que los modelos ajustados no representan adecuadamente a los datos observados por lo que se debería usar modelos más complejos o incorporar nuevos términos ampliando el diseño experimental para obtener más puntos de datos y mejorar los modelos.

La evaluación del contenido de cenizas se encuentra estrechamente relacionada al RM%. También en este caso se encontró un modelo con un alto porcentaje de variabilidad de la respuesta (99,77%) y una falta de ajuste no significativa. El tiempo de pulido tuvo un efecto significativo lineal negativo y uno cuadrático positivo sobre el contenido de cenizas. Por otro lado, la humedad mostró un efecto cuadrático negativo sobre este parámetro. También, se observó una interacción humedad*tiempo de pulido positiva sobre las cenizas. En la gráfica de superficie respuesta, se puede apreciar el marcado efecto que tiene el tiempo de pulido sobre el rendimiento de molienda (Figura 2.9 a y b) y el contenido de cenizas, mientras que el de la humedad es menos evidente. Los sorgos coloreados, SII y SG 417 mostraron R^2 altos pero las pruebas de Durbin-Watson y la de falta de ajuste mostraron p-valores significativos por lo que se concluyó que los modelos ajustados no representan adecuadamente a los datos observados.

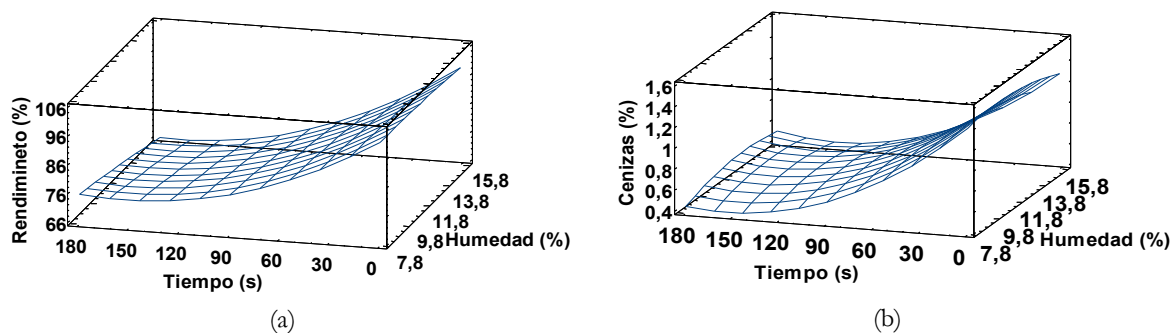


Figura 2.9. Efecto de la humedad y el tiempo de pulido sobre el rendimiento de molienda (a) y el contenido de cenizas (b) en harinas de sorgo blanco.

Con respecto a las propiedades de pasting, se observó que los modelos explicaron la variabilidad de la viscosidad de pico (PV) para WS y SG 417, el porcentaje de variabilidad de la respuesta en los modelos fueron de 98,38% y 87,72 %, respectivamente y la falta de ajuste no significativa (Tabla 2.5). El tiempo de pulido tuvo un efecto lineal significativo positivo sobre PV para WS y SG, mientras que el efecto cuadrático sobre esta variable fue negativo en las dos variedades. La humedad presentó un efecto significativo lineal negativo con PV para WS y positivo para SG, y un efecto cuadrático positivo para WS y negativo para SG. También, se observó una interacción humedad*tiempo de pulido negativa sobre PV para WS. En general mayores tiempos de pulido se asociaron con valores más altos de PV (Figura 2.10 a y b). El híbrido SII mostró R^2 altos pero las pruebas de Durbin-Watson y la de falta de ajuste mostraron p-valores significativos.

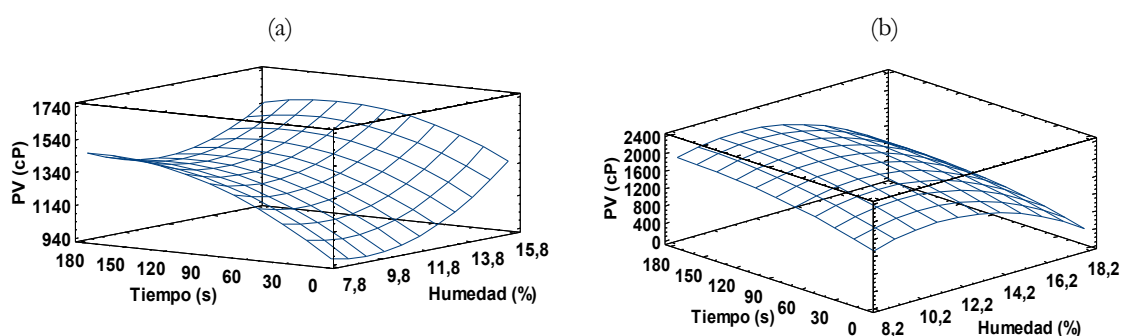


Figura 2.10. Efecto de la humedad y el tiempo de pulido sobre la viscosidad del sistema en harinas de sorgo blanco (a) y sorgo Gen 417 (b).

Finalmente, se analizó el efecto de la humedad y el tiempo de pulido sobre el diámetro medio de las partículas ($D_{4,3}$) de las harinas. Los sorgos blancos y SG 417 presentaron modelos ajustados que no representan adecuadamente a los datos observados (las pruebas de Durbin-

Watson y la de falta de ajuste mostraron p-valores significativos) mientras que SII mostró un bajo ajuste del modelo a los datos observados (R^2 : 64,5%).

Tabla 2.5. Coeficientes de regresión y significancia estadística del modelo de predicción para las variables de respuesta.

Variable independiente	Variedad	RM	Cenizas	PV	D 4,3
Constante		98,40	0,88	1810,07	-150,39
A:Humedad		0,58 *	0,10	-185,91 *	125,79
B:Tiempo		-0,31 *	-0,01 *	7,31 *	-0,05
AA	Sorgo Blanco (WS)	-0,04	-0,01 *	9,93 *	-5,94
AB		-4,36E-03	1,39E-04 *	-0,20 *	0,08
BB		1,13E-03	4,14E-05 *	-0,02 *	0,00
R^2 (%)		97,57	99,77	98,38	68,92
Durbin-Watson (p)		2,84	2,76	1,81	1,42
Falta de ajuste (p)		0,80	0,73	0,06	0,01
Constante		150,96	1,91	-1549,85	52,67
A:Humedad		-9,43	-0,11	534,64 *	53,73
B:Tiempo		-0,19	-0,01	8,09 *	2,30
AA	Sorgo Gen (SG)	0,41	0,01	-23,49 *	-1,90
AB		-0,01	0,00	-0,10	-0,13
BB		0,00	0,00	-0,02 *	0,00
R^2 (%)		97,87	96,70	87,72	52,35
Durbin-Watson (p)		0,80	1,76	2,05	1,14
Falta de ajuste (p)		0,00	0,04	0,15	0,00
Constante		104,76	1,29	1501,75	543,60
A:Humedad		-0,29	0,05	-13,02	-15,82
B:Tiempo		-0,32	-0,01	9,02	0,04
AA	Sorgo S II (SII)	-0,01	0,00	2,05	0,57
AB		-0,01	0,00	0,18	0,02
BB		0,00	0,00	-0,04	0,00
R^2 (%)		98,81	97,84	92,59	64,50
Durbin-Watson (p)		1,65	1,57	1,52	2,60
Falta de ajuste (p)		0,03	0,02	0,01	0,59

significancia $p < 0,05$; R^2 coeficiente de determinación; * Coeficiente significativo

Si bien algunos modelos lograron un ajuste significativo, los diseños de experimentos no fueron pensados para obtener un análisis de superficie/respuesta y su optimización, sino que se realizaron con el fin de analizar posibles interacciones entre las variables y explorar la obtención de modelos que representen su comportamiento. A fin de mejorar la capacidad predictora se deberían

incorporar nuevas mediciones ampliando los diseños experimentales para obtener más puntos de datos y mejorar los modelos.

2.3.7 Análisis multivariado

La utilización del análisis multivariado es una herramienta que permite, a partir del análisis del conjunto de datos, una mejor comprensión de las variables que son objeto del estudio y sus interacciones. Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), donde se utilizó como variables los valores estandarizados de la composición química (Tabla 2.1) y de las propiedades fisicoquímicas (Tabla 2.2, Tabla 2.3 y Tabla 2.4), mientras que las muestras fueron seleccionadas como criterio de clasificación.

En relación con la molienda por rodillos, los dos primeros componentes principales representaron el 85,8% de la variabilidad en el conjunto de datos (CP1: 58,1%, CP2: 27,7%) (Figura 2.11 a). El componente principal 1 (CP1) se definió a lo largo de su eje positivo por las variables PV, FV, SB, BD, L* y span, mientras que el eje negativo de CP1 se describió por el contenido de cenizas, MY%, PT, a*, b* y los parámetros descriptivos de la PSD (D4,3, D10, D50 y D90). La variabilidad del componente principal 2 (CP2) fue explicada a lo largo de su eje positivo por el contenido de cenizas, MY, a* y BD, y en su eje negativo por L*, b*, D10 y SB. La harina de sorgo blanco se separó claramente de los híbridos marrones según el CP2. Sin embargo, no se observó distinción entre los granos de sorgo coloreados (SII y SG 417). Las harinas WS, SG 417 y SII acondicionadas a baja humedad también se diferenciaron de las muestras con alto contenido de humedad mediante la CP1.

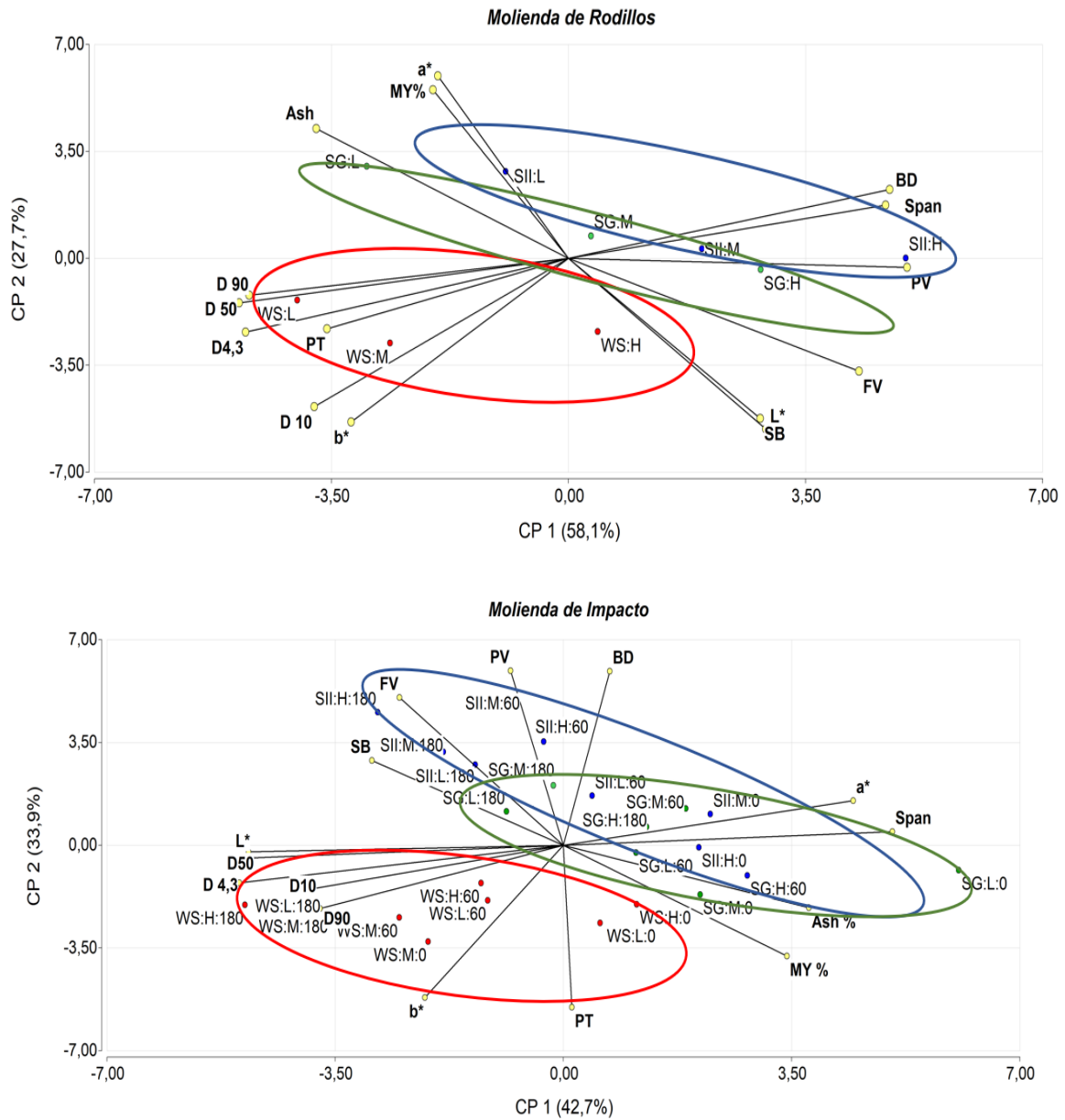


Figura 2.11. Análisis de componentes principales (PCA) de la harina de sorgo producida por molienda de rodillos (a) y de impacto (b) después del pulido.

Líneas azules, verdes y rojas agruparon los puntos de SII, SG 417 y WS respectivamente. 60, 60 s de pulido; 180, 180 s de pulido; a*, rojo; b*, amarillo; BD, desglose; FV, viscosidad final; H, alta humedad; IM, molino de impacto; L, humedad baja; L*, luminosidad; M, humedad media; MY%, rendimiento de molienda (%); Ash, contenido de cenizas (%); PV, pico de viscosidad; PT, temperatura de pasting; RM, molino de rodillos; SII, sorgo Summer II; SB, retrogradación; SG 417, sorgo gen; W, todo; WS, sorgo blanco. D10, D50, D90: diámetros donde 10%, 50% y 90% de la población de partículas cae por debajo de estos valores, respectivamente. Span: índice de polidispersidad o índice de intervalo.

Respecto a la molienda de impacto, los dos primeros componentes principales representaron el 76,6% de la variabilidad del conjunto de datos (CP1: 42,7%, CP2: 33,9%) (Figura 2.11 b). El eje positivo del CP1 se describió principalmente por el MY%, cenizas%, a* y span, mientras que el eje negativo fue explicado por L*, y parámetros descriptivos de la PSD (D4,3, D10, D50 y D90). El CP2 explicó la variabilidad mediante su eje positivo a través de PV, FV y BD, y según su eje negativo por PT y b*. Las harinas de sorgo blanco se separaron de la de los híbridos coloreados. Sin embargo, no se pudo hacer distinción entre las harinas de los granos de sorgo coloreados (SII y SG 417). Además, las harinas WS, SG 417 y SII pulidas durante 180 s se distinguieron de las muestras no pulidas. Sin embargo, no se observó una diferencia clara entre las muestras según el contenido de humedad alcanzado por el acondicionamiento. De todas maneras, el ACP permitió diferenciar las harinas de sorgo blanco de las provenientes de granos coloreados (SG 417 y SII) mediante el CP2, al igual que lo observado para la molienda por rodillos.

El análisis de los resultados de los dos tipos de moliendas mostró separaciones similares entre los híbridos en base a las propiedades analizadas. En ambos casos la CP2 permitió una mejor separación entre los híbridos coloreados y el blanco.

En el caso de la molienda de rodillos, las variables que definieron las diferencias fueron las relacionadas al tamaño de partículas de las harinas (D10, D90, D50 y D4,3), PT y, como era esperable, b*, que indica la coloración menos amarillenta en el sorgo blanco. Un comportamiento similar se observó en harinas obtenidas por molienda de impacto. A su vez las harinas de sorgos coloreados, especialmente las obtenidas en la molienda de impacto, se relacionaron con mayores perfiles de viscosidad explicados por las variables PV, FV y BD.

2.4 CONCLUSIONES

El rendimiento de harina y el contenido de cenizas obtenidos por molienda de rodillos fueron significativamente afectados por la humedad de los granos, mientras que, en la harina obtenida mediante molienda de impacto, el tiempo de pulido fue el parámetro más influyente. El contenido de cenizas disminuyó a medida que mermó el rendimiento de la molienda, tanto en molienda de impacto como de rodillos.

Respecto a los perfiles de viscosidad se observó que los de las harinas obtenidas por molienda de rodillos fueron superiores a las obtenidas por pulido y posterior molienda de impacto. En ambos tipos de moliendas se vio que la variedad del sorgo y el acondicionamiento tuvieron un papel importante en la viscosidad alcanzada en el sistema. Un mayor contenido de humedad y tiempo de pulido condujeron a una viscosidad significativamente superior. Esta característica podría ser relevante en harinas utilizadas para la elaboración de productos alimenticios.

Por otra parte, los parámetros de color de las harinas molidas con rodillos se vieron afectados significativamente por los híbridos de sorgo y el contenido de humedad del grano, mientras que para harinas obtenidas por pulido y molienda de impacto, estos fueron principalmente modificados por el tiempo de pulido. El color rojizo y la luminosidad disminuyeron de acuerdo con la eliminación de la capa externa durante el pulido; sin embargo, el amarillo estuvo determinado principalmente por el tipo de sorgo.

En función de las propiedades analizadas y considerando un compromiso entre maximizar la obtención de harina y los límites establecidos de cenizas según el CAA, se seleccionaron las condiciones de acondicionamiento de 12% de humedad para los granos a utilizar en molienda de rodillo e impacto, y 180 s como el tiempo de pulido de granos previo a la molienda de impacto. A su vez se decidió continuar los ensayos con solo una variedad de sorgo coloreada (SG 417) y la variedad de sorgo blanco, en base a que el análisis de CPA no mostró diferencias entre los híbridos coloreados. Esto permitió ajustar el diseño muestral y profundizar su estudio para usos específicos.

3

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LAS HARINAS DE SORGO DURANTE SU ALMACENAMIENTO

3.1 INTRODUCCIÓN

Los granos de sorgo intactos se pueden almacenar durante largo tiempo sin cambios en su calidad. Sin embargo, durante y después de la molienda del grano, los lípidos sufren varios cambios debido a la acción de las enzimas lipolíticas, que se localizan principalmente en las regiones de aleurona, subaleurona y germen, lo que afecta la calidad sensorial de las harinas y los productos. Los granos de sorgo tienen un contenido de grasa de 3-4 g/100 g y entre sus partes, el pericarpio y el germen contienen la mayor parte del material lipídico (Serna-Saldivar y Rooney, 1995).

El almacenamiento de la harina de sorgo es problemático debido a la dificultad para separar el germen rico en aceite, que está profundamente incrustado en el endospermo (Meera et al., 2011). La oxidación es una de las principales causas de deterioro de compuestos lipofílicos, lo que conduce al desarrollo de olores y sabores rancios (Laguerre et al., 2007).

Durante el proceso de molienda, el esfuerzo mecánico favorece la difusión del aceite y el contacto con las enzimas que degradan los triglicéridos. Esto produce un aumento de ácidos grasos libres y al mismo tiempo, una vez que la fracción lipídica está expuesta al aire, la oxidación aumenta, afectando las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de la harina en un corto periodo de almacenamiento (Zhang y Hamaker, 2005).

Por otro lado, el envejecimiento en las harinas conduce a cambios químicos y físicos que tienen repercusión en sus propiedades organolépticas y funcionales. En el trigo este es un fenómeno ampliamente estudiado, sin embargo, la intervención de numerosos factores lo hacen complejo y difícil de predecir (Doblado-Maldonado et al., 2012). Gili et al. (2017), analizaron la estructura del

germen del trigo y sus cambios asociados a los procesos de molienda e informaron que como consecuencia de la molienda se produce la ruptura celular y la redistribución de la fase lipídica. Esto, aumenta la acción de las enzimas hidrolíticas presentes en el germen que actúan sobre los triglicéridos del aceite. Una mayor actividad enzimática puede explicar el aumento de acidez del aceite y la reducción de la vida útil a solo unos cuantos días. En el caso del sorgo existen escasas investigaciones relacionadas con la estabilidad de la harina (de Oliveira et al., 2017). Se sabe que es susceptible a rancidez y desarrolla mal sabor dentro de un lapso corto cuando se almacena en forma de harina (Zhang y Hamaker, 2005). La mayoría de los esfuerzos se centran en eliminar el germen y el salvado que son los componentes principalmente involucrados en los cambios sensoriales (Palavecino et al., 2019c; van der Merwe et al., 2005; Zhao y Ambrose, 2018). Recientemente se han realizado investigaciones con intención de aumentar la vida útil de la harina de sorgo mediante la aplicación de tratamientos térmicos y de microondas a los granos previo a la molienda con resultados prometedores (Adebowale et al., 2020; Meera et al., 2011).

Por otra parte, la contaminación microbiológica es un factor importante que considerar durante el almacenamiento de las harinas. Si bien es un producto seco y por ello menos susceptible a contaminación que alimentos con gran contenido de agua, igualmente pueden sufrir deterioro por la presencia de microorganismos.

Respecto al sorgo existe escasa información sobre la contaminación microbiológica y la vida útil de la harina. En el caso del trigo, la baja actividad de agua del grano y las prácticas de almacenamiento utilizadas por la industria de la molienda no favorecen el crecimiento de microorganismos, aunque ciertos patógenos pueden sobrevivir en estado latente durante largos períodos de tiempo (Eglezos, 2010). De hecho, varios estudios han documentado la presencia de patógenos, como *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, y *Bacillus cereus*, en granos de trigo (Berghofer et al., 2003; Eglezos, 2010). También han sido aislados mohos productores de micotoxinas, como *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp. y *Penicillium* spp., (Birck et al., 2006). Además de los microorganismos patógenos, una amplia variedad de bacterias que deterioran los alimentos se encuentra entre la flora microbiana natural de los granos de trigo (Sabillon et al., 2016).

Los pasos de molienda, incluida la limpieza, el acondicionamiento y la trituration, tienen un bajo impacto en la contaminación microbiana. Sin embargo, a medida que el grano pasa por los diversos sistemas del molino, los contaminantes microbianos se redistribuyen y concentran en

ciertas fracciones molidas, particularmente en el germen y el salvado (Berghofer et al., 2003). Por lo tanto, se puede esperar que la mayoría de los microorganismos originalmente localizados en el grano estén presentes en los productos molidos (Sabillon et al., 2016).

La molienda en seco permite la eliminación de la mayor parte del grano que contiene lípidos (germen y salvado), aunque en el deterioro de la harina también se deben tener en cuenta otros factores como la humedad de los granos previa a la molienda, la temperatura de almacenamiento, la carga microbiológica inicial, entre otros (Meera et al., 2011). Dentro de los factores mencionados, el contenido de humedad de la harina es muy importante en cuanto a su vida útil, y cuanto menor sea mejor será su estabilidad durante el almacenamiento. El crecimiento de microorganismos, especialmente de ciertas especies de hongos, se ve favorecido por mayores contenidos de humedad (Nasir et al., 2003).

En este capítulo se evaluó el comportamiento de harinas de sorgo durante un ensayo de almacenamiento de 150 días. Se analizaron muestras de harinas refinadas (pulido o tamizado) e integrales. Se determinaron las características microbiológicas al inicio y final del almacenamiento. Además, se realizaron ensayos físicoquímicos y funcionales de las harinas durante los 150 días, a intervalos de tiempos establecidos, a fin de analizar los cambios ocurridos de manera dinámica y su estabilidad.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Materiales

Para el ensayo de vida útil se seleccionaron dos híbridos comerciales de granos de sorgo: un sorgo marrón (Gen 417) (SG) y uno blanco (WS), ambos multipropósitos. La descripción de los granos utilizados se encuentra en el Capítulo 2, apartado 2.2.1.

3.2.2 Proceso de molienda

Se seleccionaron condiciones de pulido y molienda según los resultados obtenidos en los ensayos previos realizados (Capítulo 2). Las muestras de granos de sorgo limpios se acondicionaron al 12% de humedad por 24 h y luego se pulieron y molieron (180 s). El rendimiento de molienda fue de $72,51 \pm 2,52\%$ y $67,07 \pm 3,22\%$ para harina de sorgo blanco (PWS-IM) y de sorgo Gen 417 (PSG-IM), respectivamente. Las muestras pulidas se sometieron a molienda de impacto según se describió anteriormente (Capítulo 2, apartado 2.2.4). Además, se obtuvieron harinas integrales de sorgo blanco (WWS-IM) y Gen 417 (WSG-IM) bajo las mismas condiciones.

Por otro lado, se obtuvieron muestras por molienda de rodillos y posterior tamizado según el procedimiento descrito en el Capítulo 2, apartado 2.2.5. Se utilizaron las mismas variedades de sorgos y acondicionamiento que en la molienda de impacto. El rendimiento de molienda fue del $51,33 \pm 2,38\%$ y $56,20 \pm 2,98\%$ para harina de sorgo blanco (WS-RM) y de sorgo Gen 417 (SG-RM), respectivamente.

3.2.3 Diseño del ensayo de almacenamiento prolongado de las harinas

Para el ensayo de almacenamiento de las harinas se obtuvieron seis muestras, tres correspondientes a sorgo blanco (WWS, PWS-IM, WS-RM), y tres a sorgo marrón (WSG-IM, PSG-IM y SG-RM) (apartado 3.2.2).

Las harinas se colocaron en bolsas plásticas (polietileno de 50 μm) termo selladas y se almacenaron a temperatura ambiente controlada (22 ± 2 °C) en oscuridad. El tiempo total del ensayo fue definido en 150 días en concordancia con otros estudios (de Oliveira et al., 2017; Miranda-García, 2013; Wang y Flores, 2009). Cada 30 días una bolsa de cada muestra fue retirada y congelada a -40°C a fin de interrumpir el almacenamiento a temperatura ambiente, para su posterior análisis fisicoquímico. Para los ensayos microbiológicos se tomaron muestras a los 0 y 150 días que fueron inmediatamente analizadas.

3.2.4 Determinación de indicadores microbiológicos

Los ensayos microbiológicos fueron remitidos al centro de Química Aplicada (CEQUIMAP), Facultad de Ciencias Químicas (Universidad Nacional de Córdoba). Se realizó el recuento de coliformes totales (UFC/g) (ISO 4832:2006 ICMSF, método 4, FDA-AOAC, 2001), mohos y levaduras (UFC/g) (ISO 21527-2:2008-FDA, 2001,) y bacterias aerobias mesófilas (UFC/g) (ISO 4833: 2003 FDA,2001,) al tiempo inicial (T:0 días) y final del ensayo (T:150 días). A su vez se realizó solo a tiempo inicial la determinación de presuntos *Bacillus cereus* (UFC/g) (ISO 7932:2004 FDA, 2001) a fin de determinar la existencia contaminación previa. Debido a que esta bacteria se adquiere principalmente durante el crecimiento de la planta y/o cosecha, ya que el hábitat natural es el suelo (Stenfors Arnesen et al., 2008), su ausencia a tiempo inicial justificó no continuar con su determinación a tiempos de almacenamiento posteriores.

3.2.5 Acidez total titulable en harinas (ATT)

Se determinó la acidez total en harinas según el método directo de la AACC 2010 (02-31). Para esto se pesaron 2 g de harina y se mezclaron con 20 mL de agua destilada. A esta suspensión se le agregó como indicador 4 gotas de fenolftaleína (2,5% p/v en etanol). La mezcla se tituló con una solución de NaOH 0,1 M. Las determinaciones se realizaron por duplicado y los datos se expresaron como % de ácido láctico.

$$ATT = \frac{G.N.f.100}{g \text{ muestra}} \quad (3.1)$$

G: mL de NaOH gastados; N: Normalidad de la solución de NaOH; f: Meq de ácido láctico (0,049 factor de la acidez para harinas en ácido láctico); g muestra: peso de la muestra a analizar

3.2.6 Índice de Peróxidos (IP)

La técnica se llevó a cabo según lo indicado por la AOCS, (2009). Para esto se pesaron $5,00 \pm 0,05$ g de aceite, y se colocaron en un Erlenmeyer de 250 ml. Se agregaron 30 ml de solución de ácido acético:cloroformo (3:2, v/v) y se agitó vigorosamente hasta su disolución. Se adicionaron 0,5 ml de solución saturada de ioduro de potasio, se agitó y luego se dejó en reposo en oscuridad durante 1 min. Posteriormente, se incorporaron 30 ml de agua destilada y se tituló, agitando continuamente, con solución 0,1 N de tiosulfato de sodio (Na_2SO_3) hasta la desaparición del color amarillo. Finalmente se adicionaron 0,5 ml de solución de almidón (1%, p/v) y se continuó titulando hasta la desaparición del color azul. El índice de peróxidos (expresado como miliequivalentes de oxígeno/kg de aceite) se calculó en base a la siguiente ecuación:

$$IP = (S \times N^* \times 1000) / (\text{g de aceite})$$

S = ml de solución de tiosulfato de sodio consumidos.

N = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

* Cuando se utilizan menos de 0,5 ml de solución 0,1 N, se repite la determinación con solución 0,01 N. La determinación se realizó por duplicado ($n = 2$) y los resultados fueron expresados como el valor promedio \pm la desviación estándar.

3.2.7 Perfiles de viscosidad

Los perfiles de viscosidad se determinaron siguiendo el procedimiento y equipamiento descritos en el Capítulo 2, apartado 2.2.10.

3.2.8 Ensayo de oxidación acelerada

Para este ensayo se separó previamente el aceite de las muestras de harinas mediante la extracción en frío con hexano. El hexano (grado analítico) se adicionó a las muestras (1:10 p/v), posteriormente se mantuvieron durante 30 min en un agitador orbital mecánico a 150 rpm. El hexano recolectado se centrifugó (5 min, 1000x g) para eliminar los sólidos en suspensión y luego el sobrenadante fue evaporado a presión reducida a $40 \pm 1^\circ\text{C}$ para eliminar el solvente.

Se evaluó el tiempo de inducción de los aceites (h) mediante el método Rancimat (Metrohm, Herisau, Suiza). En esta metodología, los compuestos de oxidación de naturaleza volátil son transportados a una celda de medición, donde se dispersan en un medio de muy baja conductividad. De este modo, mediante el registro de la conductividad en función del tiempo, se obtienen curvas de oxidación, cuyo punto de inflexión es el tiempo de inducción. Esta magnitud permite evaluar la estabilidad oxidativa de la muestra (Frankel, 2005).

Se pesaron $1,50 \pm 0,01$ g de aceite y se colocaron en los recipientes de reacción. Las muestras fueron calentadas a presión atmosférica a la temperatura seleccionada y se burbujeó con oxígeno a un flujo constante. A partir de dos programas de temperatura, 90 y 120 °C, y un caudal de aire de 20 mL air/h, (Velasco et al., 2000) se obtuvo el tiempo de inducción (T_i , en horas) de las muestras a los 0 (tiempo inicial) 90 y 150 días (tiempo final). Se realizaron 2 determinaciones ($n=2$) por cada muestra analizada

3.2.9 Análisis estadístico

Los ensayos se realizaron al menos por duplicado y los resultados se expresaron como el valor promedio \pm la desviación estándar. Se efectuó el tratamiento estadístico de los datos mediante análisis de varianza (ANOVA). Para el análisis los datos se dividieron en grupos según la variedad de sorgo y el proceso de molienda efectuado. Las medias fueron comparadas por la prueba LSD Fisher a un nivel de significancia de 0,05 ($p \leq 0,05$) utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2015). Todos los gráficos se obtuvieron utilizando el software Excel (Office Versión 365, Microsoft).

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Caracterización microbiológica de harinas

En el ensayo de almacenamiento de harinas de sorgo, se analizó la presencia de bacterias, hongos y levaduras relacionados con la inocuidad alimentaria. En los requisitos que debe cumplir la harina de sorgo según el CAA no figuran parámetros microbiológicos, sin embargo, a fin de comparar con harinas tradicionales se tomaron como referencia los valores establecidos para la harina de trigo.

En las Tabla 3.1 se muestran los resultados del ensayo microbiológico en harinas de sorgo. Dentro de los parámetros analizados, la cuantificación de mohos y levaduras en los alimentos resulta importante ya que estos tienen la capacidad de producir diferentes grados de deterioro y descomposición. Además, algunos hongos pueden producir metabolitos tóxicos (micotoxinas) que no siempre son destruidas con el tratamiento térmico y pueden conducir a enfermedades crónicas (mutagénesis, cáncer, etc.) y también producir reacciones alérgicas especialmente en ancianos, niños y población inmunocomprometida (RENALOA, 2014).

El recuento de UFC de mohos y levaduras se encontró debajo del límite establecido para harinas de trigo según el CAA (10^3 UFC/g), tanto al inicio como al final del ensayo de almacenamiento, en todas las muestras. Sin embargo, las determinaciones realizadas al final del ensayo evidenciaron un aumento significativo de las UFC de mohos en todas las muestras, a excepción de WWS-IM en la que se mantuvieron sin cambios respecto al inicio.

Las especies bacterianas denominadas coliformes totales resultan de gran interés para analizar la calidad microbiológica de alimentos. Estos microorganismos se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza, se los puede encontrar en el suelo, el agua, los vegetales, y también forman parte de la flora intestinal de los seres humanos y de los animales de sangre caliente y fría. La presencia de bacterias coliformes en los alimentos no significa necesariamente que hubo una contaminación fecal o que hay patógenos entéricos presentes. Las bacterias coliformes son particularmente útiles como parte de criterios microbiológicos para indicar contaminación post-proceso térmico (RENALOA, 2014).

Tabla 3.1. Determinación de coliformes totales (a), mohos y levaduras (b) y aerobios mesófilos (c) en harinas de sorgo al inicio y final del ensayo de almacenamiento.

(a)					(b)				
Coliformes Totales (UFC/g)					Mohos y levaduras (UFC/g)				
Muestras	Periodo almacenamiento				Muestras	Periodo almacenamiento			
	0 (días)		150 (días)			0 (días)		150 (días)	
WWS-IM	204500	b	1950	a	WWS-IM	25	a	25	a
WSG-IM	27250	b	475	a	WSG-IM	95	a	1150	b
PWS-IM	28000	b	92,5	a	PWS-IM	0	a	132,5	b
PSG-IM	11250	b	10	a	PSG-IM	0	a	25	b
WS-RM	315000	b	17500	a	WS-RM	440	a	775	b
SG-RM	31000	b	45	a	SG-RM	147,5	a	4200	b

(c)				
Aerobios mesófilos (UFC/g)				
Muestras	Periodo almacenamiento			
	0 (días)		150 (días)	
WWS-IM	237500	b	4100	a
WSG-IM	152500	b	1750	a
PWS-IM	36700	b	885	a
PSG-IM	14250	b	215	a
WS-RM	37,5	a	4050	b
SG-RM	87500	b	2400	a

Los valores se expresan como media (n=2). Letras diferentes en la misma fila, indican valores significativamente diferentes ($p < 0,05$). W: Integral; SG: sorgo Gen 417; WS: sorgo blanco; IM: molino de impacto; RM: molino de rodillos; P: pulido.

Respecto a las UFC de coliformes totales a tiempo inicial; todas las muestras superaron el límite establecido según el CAA (10^2 UFC/g), mientras que a los 150 días el recuento disminuyó. Las harinas WWS-IM, y WS-RM presentaron valores que superaron el límite al final del almacenamiento. En este caso su presencia, obliga a prestar atención a la etapa previa de obtención y almacenamiento del producto a fin de identificar el origen de la contaminación.

Finalmente se analizó el contenido de aerobios mesófilos, estos resultan importante como microorganismos indicadores de la calidad sanitaria de los productos analizados. Estos reflejan las condiciones higiénicas de la materia prima y la forma como fueron manipulados durante su elaboración. Solamente se identifican microorganismos vivos por lo que es necesario conocer la historia del producto. Un recuento bajo de aerobios mesófilos no asegura la ausencia de patógenos o sus toxinas, al igual que un recuento elevado no significa presencia de flora patógena. De todas

maneras, salvo en alimentos fermentados, es deseable que los recuentos sean bajos ya que valores elevados pueden significar la posibilidad de que existan patógenos (RENALOA, 2014). Las muestras WWS-IM y WSG-IM a tiempo inicial se situaron sobre el límite permitido según (10^5 UFC/g), mientras que al finalizar el ensayo de almacenamiento todas las muestras disminuyeron sus recuentos a valores inferiores al límite establecido por el CAA para harina de trigo. El mismo comportamiento fue observado en el recuento de coliformes totales. Es importante considerar que estos microorganismos pueden liberar toxinas que permanezcan en el alimento, aún luego de que ellos ya no se encuentren viables.

La disminución del pH durante el almacenamiento de la harina contribuye a la disminución del recuento bacteriano debido a que, para su crecimiento óptimo, estas necesitan de un medio preferentemente básico y una alta concentración de proteínas, mientras que los mohos y levaduras son más tolerantes a la acidez y pueden desarrollarse en medios ligeramente ácidos (Manca et al., 2006). En este sentido, Wang y Flores (2009) observaron que los conteos bacterianos en harina de trigo tuvieron una disminución de más del 50% después de un almacenamiento de 26 días.

Las determinaciones microbiológicas realizadas no indicaron una clara diferencia entre las muestras obtenidas por molienda de impacto y rodillo, durante el tiempo de almacenamiento. Sin embargo se observó que el contenido de salvado fue el factor más determinante en la presencia de bacterias coliformes y aerobios mesófilos, especialmente en WWS-IM, a tiempo inicial.

3.3.2 Determinación de acidez total titulable en harinas (ATT)

La acidez en harinas es un parámetro que generalmente aumenta con el tiempo de almacenamiento. Esto es atribuido a la ocurrencia de diferentes fenómenos: la hidrólisis gradual de los lípidos, que originan ácidos grasos libres; la hidrólisis de las proteínas, los aminoácidos y la aparición de productos intermedios de la descomposición de proteínas; la producción de ácido fosfórico; entre otros (Hansen y Rose, 1996).

Se observó un aumento de la acidez en todas las muestras obtenidas mediante molienda de impacto entre el tiempo inicial y final (Tabla 3.2). Sin embargo, solo WWS-IM presentó un

incremento significativo ($p < 0,05$) en la acidez a todos los tiempos almacenamiento. Los valores de acidez de WWS fueron significativamente superiores ($p < 0,05$) respecto al resto de las muestras, tanto al inicio como al final del almacenamiento. El mayor aumento de la acidez en muestras integrales es esperable debido a que estas conservan las fracciones de salvado y germen, ricas en lípidos, que son susceptibles a reacciones de hidrólisis y oxidación. El aumento de la acidez de las grasas durante el almacenamiento puede atribuirse a la actividad de la lipasa que hidroliza los ácidos grasos con el consecuente aumento de ácidos grasos libres (AGL) (Salman y Copeland, 2007). En este sentido, si bien el CAA no explicita un valor máximo de acidez permitido para harina de sorgo ni para harina de trigo, sí lo hace para almidón (Máx. 5,00%). Aunque no es correcto realizar una comparación directa, todas las muestras se encontraron debajo de este valor, lo que nos permitió analizar el comportamiento general de la harina con el tiempo de almacenamiento.

Tabla 3.2. Determinación de la acidez total en harinas almacenadas durante 150 días.

Tiempo (días)	Acidez total titulable (% ácido láctico)					
	WWS-IM	WSG-IM	PWS-IM	PSG-IM	WS-RM	SG-RM
0	0,31 ^a	0,12 ^a	0,12 ^a	0,08 ^a	0,16 ^a	0,10 ^b
30	0,43 ^b	0,13 ^a	0,16 ^b	0,10 ^b	0,21 ^b	0,08 ^a
60	0,48 ^b	0,12 ^a	0,18 ^{bc}	0,10 ^b	0,25 ^b	0,09 ^{ab}
90	0,63 ^c	0,12 ^a	0,16 ^b	0,11 ^b	0,22 ^b	0,08 ^a
120	0,61 ^c	0,11 ^a	0,19 ^c	0,11 ^b	0,21 ^b	0,11 ^b
150	0,82 ^d	0,22 ^b	0,18 ^{bc}	0,10 ^b	0,24 ^b	0,10 ^b

Los valores se expresan como media ($n=2$). Letras distintas en la misma columna indican valores significativamente diferentes ($p < 0,05$) entre la misma muestra. W: Integral; SG: sorgo Gen 417; WS: sorgo blanco; IM: Molino de Impacto; RM: Molino de Rodillos; P: pulido.

Sin embargo, la determinación de la acidez total también involucra otros componentes de las harinas susceptibles a la degradación como proteínas, carbohidratos, etc. A diferencia de WWS-IM, WSG-IM tuvo un comportamiento similar a las harinas refinadas, lo que podría explicarse por la mayor presencia de polifenoles en esta variedad de sorgo de testa pigmentada (Dykes et al., 2009). Los polifenoles pueden ejercer un efecto protector de la oxidación (Rao et al., 2018) lo que pudo haber disminuido el deterioro de las muestras.

Hrusková y Machová (2018) también informaron un aumento de la acidez en muestras de harina de trigo almacenada por 120 días bajo dos condiciones diferentes de temperatura. En este

caso observaron que las muestras mantenidas a temperaturas inferiores (10 °C – 14 °C) no obtuvieron valores significativamente diferentes de aquellas almacenadas a temperaturas más elevadas (18 °C- 20 °C). Las muestras molidas por rodillos (WS-RM y SG-RM) presentaron un aumento significativo de la acidez a partir de los 30 días de almacenamiento ($p < 0,05$) (Figura 3.1). Posteriormente, WS-RM evidenció un pequeño incremento en los valores de acidez, pero no fue significativo, mientras que para SG-RM los valores se mantuvieron prácticamente constantes.

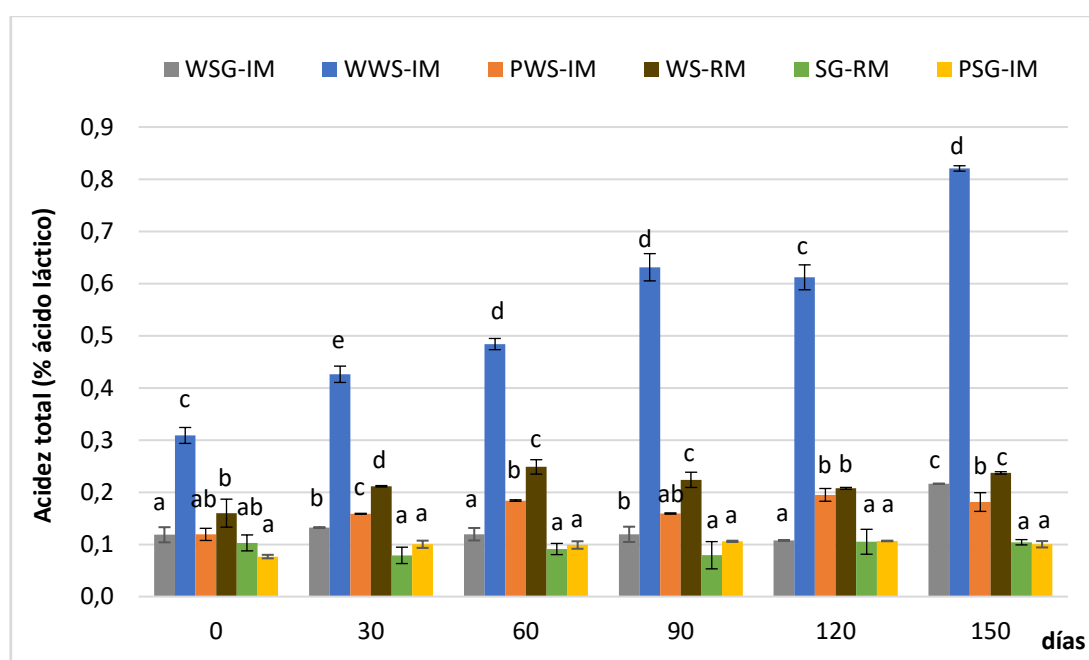


Figura 3.1. Comparación del efecto del almacenamiento sobre la acidez de las harinas obtenidas mediante molienda de impacto y rodillos.

W: Integral; SG: sorgo Gen 417; WS: sorgo blanco; IM: Molino de Impacto; RM: Molino de Rodillos; P: pulido. Letras diferentes entre muestras con igual tiempo de almacenamiento indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Al comparar los resultados entre muestras al mismo tiempo de almacenamientos, WWS-IM obtuvo los mayores valores de AT^T% a todos los tiempos de almacenamiento ($p < 0,05$) con un progresivo aumento hasta el fin del ensayo (Figura 3.1). Zhang y Hamaker (2005), atribuyeron el aumento de la acidez en muestras de harina de sorgo integral almacenada durante dos meses, a la liberación de ácidos grasos, debido a una mayor actividad lipásica con el paso de tiempo.

PSG-IM y SG-RM fueron las muestras que mantuvieron los menores niveles de acidez durante todos los tiempos (Figura 3.1). Esto se relacionó con la variedad de sorgo coloreado (mayor

presencia de polifenoles) y el menor contenido de salvado de las muestras, debido a que se les extrajo la mayor parte mediante pulido o tamizado, según correspondiese.

3.3.3 Análisis de los perfiles de viscosidad de las harinas

El tiempo y las condiciones de almacenamiento influyen en las cualidades tecnológicas de las harinas, por lo que pueden ocurrir modificaciones en parámetros como la capacidad de retención de agua y la viscosidad de la masa (Hrusková y Machová, 2018). En la Tabla 3.3 y la Tabla 3.4 se detallan los perfiles de viscosidad de las harinas analizadas.

Tabla 3.3. Perfiles de viscosidad de harinas obtenidas mediante molienda de rodillos.

Muestras	Días	PV (Cp)	BD (Cp)	FV (Cp)	SB (Cp)	PT (Cp)
WS-RM	0	1851 a	104 a	2988 a	1240 a	86 a
	30	2064 ab	130 a	3376 b	1442 ab	86 a
	60	1924 a	82 a	3322 b	1479 ab	88 a
	90	2007 ab	95 a	3523 b	1612 b	88 a
	120	2026 ab	94 a	3548 b	1617 b	88 a
	150	2271 b	284 a	3552 b	1566 b	87 a
SG-RM	0	2325 a	639 b	2914 a	1228 a	78 a
	30	2405 ab	486 ab	3248 b	1329 ab	81 b
	60	2567 bcd	575 ab	3440 c	1448 bc	82 b
	90	2606 d	505 ab	3595 d	1494 c	84 c
	120	2587 cd	511 ab	3569 d	1493 c	85 cd
	150	2433 bc	421 a	3523 cd	1512 c	86 d

Los valores se expresan como media (n=2). Letras diferentes en la misma columna, entre muestras del mismo híbrido de sorgo, indican valores significativamente diferentes ($p < 0,05$). SG: sorgo Gen 417; WS: sorgo blanco. PV: pico de viscosidad; BD: viscosidad de ruptura; FV: viscosidad final; SB: retrogradación; PT: temperatura pico.

Tabla 3.4. Perfiles de viscosidad de harinas obtenidas por molienda de impacto.

Muestras	Días	PV (Cp)	BD (Cp)	FV (Cp)	SB (Cp)	PT (Cp)
WWS-IM	0	924 a	63 a	1966 a	1104 a	90 a
	30	926 ab	106 b	2530 b	1710 b	92 b
	60	957 abc	103 b	2935 c	2082 c	93 b
	90	953 bc	107 b	2984 cd	2138 cd	93 b
	120	985 cd	97 b	3062 d	2174 d	93 b
	150	1016 d	99 b	3187 e	2270 e	93 b
WSG-IM	0	1163 a	168 d	1905 a	910 a	85 a
	30	1346 b	111 b	2373 b	1138 b	89 b
	60	1388 bc	74 a	2472 c	1158 b	91 b
	90	1426 c	59 a	2495 c	1127 b	90 b
	120	1561 d	102 b	2700 d	1241 c	90 b
	150	1671 e	136 c	2856 e	1321 d	89 b
WS-IM	0	1115 ab	136 a	2338 a	1359 a	90 a
	30	1144 b	142 ab	2435 ab	1433 b	91 ab
	60	1206 c	142 ab	2559 c	1495 c	91 ab
	90	1173 bc	143 ab	2546 bc	1517 cd	92 b
	120	1065 ab	154 bc	2426 a	1515 c	92 b
	150	1145 b	165 c	2557 c	1578 d	92 b
PSG-IM	0	2017 a	258 bc	3007 a	1248 a	80 a
	30	2103 ab	261 cb	3165 ab	1323 ab	82 ab
	60	2343 c	355 d	3395 ab	1407 ab	81 ab
	90	2038 a	208 ab	3150 ab	1319 ab	84 bc
	120	2264 c	297 cd	3377 ab	1410 ab	82 ab
	150	2140 c	185 a	3523 b	1568 b	86 c

Los valores se expresan como media (n=2). Letras diferentes en la misma columna, entre muestras del mismo híbrido de sorgo indican valores significativamente diferentes ($p < 0,05$). W: Integral; SG: sorgo Gen 417; WS: sorgo blanco; IM: Molino de Impacto; P: pulido. PV: pico de viscosidad; BD: viscosidad de ruptura; FV: viscosidad final; SB: retrogradación; PT: temperatura pico.

Todas las harinas presentaron un aumento significativo en los perfiles de viscosidad entre el inicio y el final del ensayo (Tabla 3.3 y Tabla 3.4). Este comportamiento fue más evidente en las harinas integrales (WWS-IM y WSG-IM), según se observa un mayor incremento de los valores de PV, SB y FV durante el almacenamiento. PSG-IM presentó los mayores valores de PV y FV al inicio y al final del tiempo de almacenamiento. Estos datos concuerdan con los obtenidos en el Capítulo 2, apartado 2.3.4, al evaluar los perfiles de viscosidad de harinas de SG 417, bajo diferentes acondicionamientos pre-molienda, donde esta variedad presentó perfiles de viscosidad significativamente superiores. Salman y Copeland (2007) observaron, de manera similar, un aumento de los perfiles de *pasting* obtenidos a partir de harinas de trigo almacenadas durante 12 meses. También ensayos realizados con harina de arroz demostraron un incremento de la viscosidad de pico con el tiempo de almacenamiento (hasta los 9 meses), y una posterior

disminución luego de varios meses de esa determinación (Sowbhagya y Bhattacharya, 2001). De manera contraria Mcdonough et al. (2004) reportaron una disminución en los perfiles de viscosidad de harinas de sorgo durante el envejecimiento, sin embargo es necesario considerar que en este estudio utilizaron altas temperaturas (85 °C y 120 °C) por un corto periodo de tiempo (15 días) para acelerar el envejecimiento.

La viscosidad final (FV) es indicativa de la retrogradación de las moléculas de almidón al formar un gel o agregados semicristalinos. También, el aumento de FV de las pastas de almidón en presencia de ácidos grasos es una medida cuantitativa de la magnitud de la formación del complejo lípido-almidón (Liang et al., 2002; Salman y Copeland, 2007). Zhang y Hamaker (2005) reforzaron estas afirmaciones luego de agregar una alta cantidad de ácidos grasos libres, preparados en el laboratorio, a muestras de harinas de sorgo integral y como resultado observaron un aumento significativo en FV. Los autores relacionaron estos hallazgos con una triple interacción formada por fuerzas iónicas aportadas por el grupo carboxilato de los ácidos grasos libres (cargados negativamente, $pK_a \sim 4,8$), los grupos aminos de las proteínas presentes (cargados positivamente) y el almidón. El aumento de la acidez en este ensayo, relacionada con la liberación de ácidos grasos libres durante el almacenamiento de las harinas de sorgo es consistente con esta conclusión. Probablemente los ácidos grasos liberados durante el almacenamiento formaron complejos con la amilosa durante el proceso de gelatinización, lo que explicaría el aumento de FV en todas las muestras respecto al tiempo inicial.

3.3.4 Evaluación de la producción de compuestos de oxidación

La oxidación en matrices complejas con baja actividad de agua, tal es el caso de las harinas, ocurre mediante diversos mecanismos que involucran cambios en sus componentes mayoritarios como los hidratos de carbono (Hu et al., 2020), las proteínas (Fierens et al., 2015) y los lípidos (Lampi et al., 2015), y también en los minoritarios como vitaminas y minerales (Hemery et al., 2018). Si bien el almidón es el principal constituyente de los cereales, se considera que es el componente que menos se altera durante el almacenamiento (George y McCracken, 2003). Sin embargo, a pesar de que los lípidos son un componente cuantitativamente menor en los granos de

cereales, se deterioran con mayor facilidad causando ranciedad (Galliard, 1986; Pomeranz, 1992). Los cambios en los lípidos debido a la oxidación o hidrólisis son mínimos en el grano entero, pero son bastante pronunciados en harina cuando la integridad el grano es destruida por la molienda, y los lípidos pierden su protección contra la oxidación (Pomeranz, 1992).

Para evaluar el efecto del almacenamiento en la rancidez lipídica, en primer lugar, se determinó el índice de peróxidos del aceite de las harinas. La oxidación de los sistemas complejos generalmente origina ciertos productos que se pueden detectar por métodos fisicoquímicos. En este sentido los hidroperóxidos son considerados como los productos de oxidación primaria que aportan la información más relevante en relación con la intensidad de la lipoperoxidación (Laguerre et al., 2007). El aceite extraído de las harinas no presentó valores detectables de peróxidos al inicio ni final del ensayo, excepto la muestra WSG-IM que presentó un IP de $4,91 \pm 0,15$ meq de O_2/kg de aceite, a los 150 días de almacenamiento. Estos valores estuvieron muy por debajo del límite legal permitido según el CAA (15 meq O_2/kg aceite). Esto sugiere que en el tiempo de almacenamiento evaluado no se produjo una oxidación importante de los ácidos grasos.

Como se mencionó anteriormente, el grano de sorgo es fuente de compuestos fenólicos que son parcialmente responsables de su alta actividad antioxidante (de Oliveira et al., 2017). Esto pudo haber contribuido a la estabilización del aceite mediante la captación y estabilización de radicales libres. El proceso de peroxidación lipídica comienza con la generación de radicales libres, los cuales aparecen en el aceite cuando los ácidos grasos insaturados están en contacto con iniciadores de la oxidación como metales, luz, calor o lipoxigenasas. Los radicales generados rápidamente reaccionan con el oxígeno molecular para formar radicales peróxidos, los cuales poseen una gran reactividad y producen hidroperóxidos como productos primarios de oxidación (Hernández Sánchez et al., 2016). Finalmente, los hidroperóxidos interaccionan entre si generando productos estables no radicalarios del tipo dienos conjugados, compuestos volátiles, o uniéndose a macromoléculas no lipídicas presentes como polifenoles (Lampi et al., 2015).

Los polifenoles que se encuentran en el grano de sorgo demostraron tener una gran actividad antioxidante medida mediante métodos *in vitro* (Girard y Awika, 2018; Kamath et al., 2004). A su vez, este efecto ha sido más evidente en variedades coloreadas, donde se describieron mayor cantidad y variedad de compuestos polifenólicos (Kumari et al., 2021; Pontieri et al., 2021; Shen et al., 2018). Dentro de estos compuestos fenólicos, los flavonoides se han relacionado con mayor

potencial bioactivo benéfico (Girard y Awika, 2018). Las formas agliconas de eriodictiol y naringenina son las flavanonas más frecuentes (Dykes et al., 2011). Las antocianinas más comunes en el sorgo son las 3-desoxiantocianidinas, que incluyen luteolinidina y apigeninidina, que son responsables del color del grano y gran parte de la actividad antioxidante (Shen et al., 2018).

Por otra parte, la presencia de tocoferoles en el sorgo también pudo ser responsable de la estabilidad oxidativa observada en su aceite. Los tocoferoles (α -, β -, γ - y δ -) y tocotrienoles se encuentran naturalmente en los cereales y su consumo se asocia con un menor riesgo de enfermedad cardiovascular, cáncer y manifestaciones de dislipidemia (Nielsen y Hansen, 2008; Tiwari y Cummins, 2009). Las diferencias en la estructura molecular de cada isoforma están relacionadas con una variable eficacia como antioxidantes donadores de hidrógeno; siendo en general, α -tocoferol el más eficaz, seguido de γ -Toc y δ -Toc (Kamal-Eldin, 2006). La composición isomérica y el contenido de tocoferoles en el sorgo varían significativamente (Cardoso et al., 2015; Martino et al., 2012; Pinheiro-Sant'Ana et al., 2011). Cardoso et al. (2015) analizaron 100 genotipos de sorgo diferentes y encontraron una alta variabilidad en el contenido de tocoferoles y tocotrienoles (280,7–2962,4 $\mu\text{g}/100\text{ g}$). Los carotenoides variaron entre 2,12 y 85,46 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, α -tocoferol fue el isómero predominante dentro de los tocoferoles y el 23% de los genotipos analizados fueron clasificados como fuente de vitamina E. En el caso del trigo, la presencia de tocoferoles, y particularmente el isómero α -, imparte al aceite del germen un elevado poder antioxidante, sumamente valorado no sólo en la formulación de alimentos sino también en la estabilización de aceites y la producción de cosméticos (Gili et al., 2017a).

En este estudio, los resultados sugieren un fuerte grado de estabilización de los lípidos presentes debido a la presencia de antioxidantes naturales en el sorgo, como polifenoles, carotenoides y tocoferoles. de Oliveira et al. (2017), demostraron que 3-desoxiantocianinas, fenoles y taninos se mantuvieron presentes en proporciones superiores al 56%, 86% y 89% respectivamente, en harinas de sorgo luego de 120 días de almacenamiento. En el mismo sentido Cardoso et al. (2015) describieron que la actividad antioxidante de harinas de sorgo se correlacionó positivamente con el contenido de α y γ -tocoferoles, vitamina E total, polifenoles totales, y 3-desoxiantocianidinas.

3.3.5 Ensayo de oxidación acelerada

Se determinó la estabilidad oxidativa mediante la técnica de Rancimat. Este método estándar se aplica para determinar la susceptibilidad de grasas y aceites comestibles frente a la oxidación bajo condiciones aceleradas (Frankel, 2005), que permite tener una aproximación rápida de la tendencia de la muestra a ser susceptible de oxidación. La metodología se basa en el calentamiento de las muestras y el pasaje continuo de aire a alta temperatura, para provocar la oxidación de las moléculas de ácidos grasos presentes. Inicialmente, se produce la formación de productos de oxidación primaria (peróxidos), que al cabo de un tiempo se descomponen dando origen a productos de oxidación secundaria, entre ellos, ácidos orgánicos volátiles de bajo peso molecular (ácido acético y ácido fórmico, entre otros). Éstos son trasladados a un segundo recipiente con agua destilada mediante una corriente de aire, donde tiene lugar una medición continua de la conductividad, la cual aumenta junto con la presencia de ácidos volátiles (Figura 3.2 a). El tiempo necesario hasta la formación de estos productos de reacción secundarios es denominado “tiempo de inducción”, “período de inducción” o “índice de estabilidad oxidativa” y es indicativo de la susceptibilidad de la muestra a la oxidación (Figura 3.2 b) (Metrohm, 2012). En el caso de harinas su utilización refleja solamente el grado de deterioro relacionado con la fracción de aceite que contiene, pero no de otros componentes involucrados en los procesos oxidativos (Liyana-Pathirana y Shahidi, 2007).

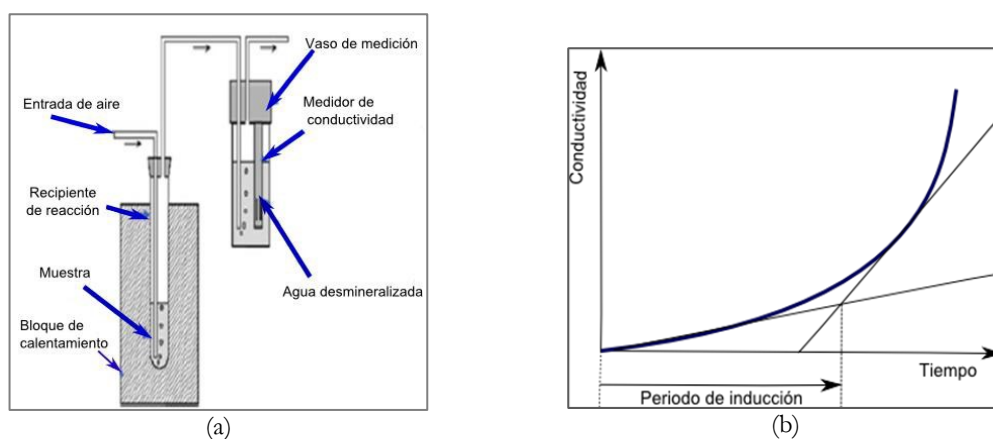


Figura 3.2. Representación esquemática de la técnica de Rancimat (a) y de la determinación gráfica del tiempo de inducción (T_i) (b).

Las muestras fueron calentadas a presión atmosférica, a la temperatura seleccionada y se burbujeó con oxígeno a un flujo constante. Bajo estas condiciones controladas, el proceso de

lipoperoxidación alcanza sus pasos finales, donde los lípidos se oxidan a ácidos volátiles de cadena corta y son recogidos en agua destilada, aumentando su conductividad (Frankel, 2005).

En la Figura 3.3 se aprecian los T_i de las harinas utilizadas en el ensayo. La observación de valores mayores de T_i indica mejor protección de la harina frente a las condiciones que promueven su oxidación. A tiempo inicial (0 días de almacenamiento) todas las muestras presentaron tiempos de inducción superiores a 12 h, sugiriendo una alta estabilidad del aceite. Las muestras pulidas y molidas por impacto (PWS-IM y PSG-IM) y SG-RM obtuvieron los mayores tiempos de inducción ($p < 0,05$). Estas harinas comparten la característica de tener una baja fracción del salvado, especialmente del germen, siendo menos propensas las reacciones de deterioro lipídico. En este ensayo es especialmente relevante el contenido de lípidos debido a que se analizan los productos de sus reacciones de oxidación. Elisia et al. (2013) analizaron los T_i de 14 aceites vegetales y encontraron que variaron entre 0,13 y 13,87 horas, siendo los más estables el aceite de macadamia ($T_i \sim 14$ h) y el aceite castor ($T_i \sim 6$ h), y los más susceptibles a la oxidación el aceite de cáñamo ($T_i < 1$ h), lino ($T_i < 1$ h) y oliva ($T_i < 1$ h).

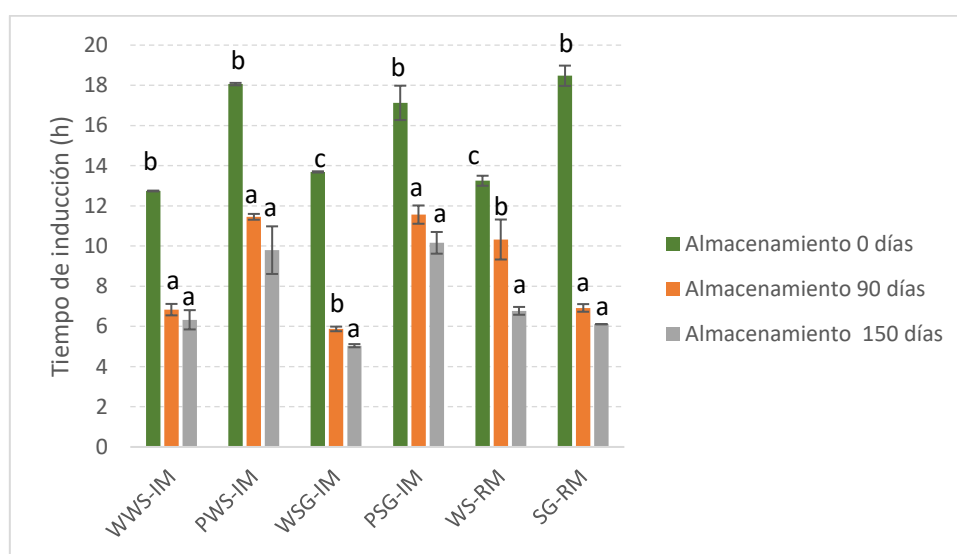


Figura 3.3. Tiempos de inducción de harinas de sorgo obtenidos a los 0, 90 y 150 días de almacenamiento.

Letras diferentes para la misma muestra indican diferencias significativas ($p < 0,05$). W: Integral; SG: sorgo Gen 417; WS: sorgo blanco; IM: Molino de Impacto; RM: molino de Rodillos; P: pulido.

La evaluación de las harinas luego de 90 días de almacenamiento evidenció una disminución significativa de los T_i en todas las muestras. Mientras que a los 150 días los valores fueron

estadísticamente similares a los obtenidos a 90 días, excepto para WSG-IM que mostró un valor aún menor. WS-RM fue la que menos diferencia presentó entre los 150 y 90 días de almacenamiento debido a que al inicio del ensayo su T_i fue menor que para las otras muestras de harinas refinadas. Estos resultados indican que el mayor deterioro fue producido en los primeros tres meses de almacenamiento y luego la estabilidad lipídica se mantuvo prácticamente constante hasta el fin del ensayo. A su vez WSG-IM presentó el menor T_i a los 150 días ($5,04 \pm 0,08$ h), lo que se relacionó con haber sido la única muestra que presentó un IP detectable inicialmente.

Estos hechos tienen similitud con lo que ocurre en la molienda del trigo. Durante el proceso el endospermo se separa del germen y salvado ya que éstos últimos limitan la vida útil de la harina, impartiendo sabores y olores no deseados debido al enranciamiento de sus lípidos. Además, disminuyen su calidad al otorgarle un aspecto menos blanquecino por la presencia de partículas de color. El efecto indeseable de desarrollo de rancidez en cortos períodos de tiempo luego de la molienda, se produce debido a la hidrólisis de triglicéridos y a la degradación oxidativa de los ácidos grasos por parte de enzimas endógenas, lipasas y lipoxigenasas (Gili et al., 2017b).

Algunos autores proponen tratamientos térmicos moderados del grano de sorgo por 15 minutos para reducir significativamente la actividad de las lipasas y extender la vida útil de las harinas de 15 días a casi ocho meses de almacenamiento (Meera et al., 2011). También (Adebowale et al., 2020), demostraron que el tratamiento con microondas de harina de sorgo integral mejoró su estabilidad y los atributos sensoriales de los productos elaborados.

3.4 CONCLUSIONES

El análisis microbiológico de las harinas de sorgo reveló que a tiempo inicial las UFC de mohos y levaduras se encontraron dentro de los límites establecidos por el CAA. Sin embargo, el recuento de UFC de coliformes totales se ubicó fuera del límite establecido y solo se ajustaron al requerimiento del CAA las harinas al final del ensayo, a excepción de WWS-IM y WS-RM. También, para aerobios mesófilos se observó que al inicio del ensayo el recuento de UFC fue mayor, especialmente para WWS-IM y WS-RM que estuvieron sobre el límite establecido, mientras que a los 150 días todas las muestras se encontraron por debajo. Estos resultados evidencian la necesidad de implementar mejoras en el manejo previo de los granos de sorgo con el fin de identificar y reducir el nivel de contaminación.

Por otra parte, se produjo un aumento de la acidez total entre el inicio y el final del ensayo en todas las harinas. Esto fue más evidente en WWS-IM, mientras el resto de las harinas mostraron variaciones menores.

Durante todo el ensayo de almacenamiento no se evidenció oxidación lipídica por formación de hidroperóxidos. Sin embargo, la evaluación mediante oxidación acelerada indicó un deterioro de lipídico a partir de los 90 días de almacenamiento, que luego se estabilizó hasta el final del ensayo. WSG-RM presentó el mayor tiempo de inducción, lo que demuestra una mayor estabilidad. Estos resultados indican que el contenido de antioxidantes del sorgo marrón probablemente favoreció la estabilidad fisicoquímica de las harinas.

Los perfiles de viscosidad aumentaron con el tiempo de almacenamiento en todas las harinas y de manera más acentuada en las integrales. Esto se relacionó con el mayor contenido de lípidos y el aumento de ácidos grasos libres que pueden interaccionar con las proteínas y el almidón.

Los resultados permiten afirmar que el almacenamiento hasta 150 días no produjo cambios considerables en las harinas, como tampoco el tipo de molienda utilizada. Además, mejorando las condiciones microbiológicas previas, las harinas obtenidas a partir de granos blancos y coloreados, por las metodologías de molienda empleadas en este trabajo, pueden almacenarse adecuadamente durante el periodo de tiempo ensayado.

4

CAPÍTULO 4: EFECTO DE HARINAS DE SORGO EN LA CALIDAD DE BIZCOCHUELOS LIBRES DE GLUTEN

4.1 INTRODUCCIÓN

La enfermedad celíaca es una enteropatía crónica producida por la intolerancia al gluten, más precisamente a ciertas proteínas llamadas prolaminas, que median una reacción inmunitaria que provoca atrofia de las vellosidades intestinales, malabsorción y síntomas clínicos, que se presenta tanto en la infancia como en la edad adulta. El único tratamiento efectivo es la adherencia estricta a una dieta libre de gluten a lo largo de la vida del paciente, lo que con el tiempo resulta en la recuperación clínica y de la integridad de la mucosa intestinal (Theethira et al., 2017).

Se estima que entre el 1 y 3% de la población mundial es celíaca y un 0,5% llevan una dieta libre de gluten por preferencia sin padecer intolerancia al gluten (Gujral et al., 2012). Esto, provoca que la demanda de productos aptos y a su vez apetecibles sea cada vez mayor. En los últimos años, se ha llevado a cabo numerosas investigaciones para el desarrollo de productos libres de gluten (Cervini et al., 2021; Dayakar Rao et al., 2016; de la Hera et al., 2013; Di Cairano et al., 2018; Giuberti et al., 2018; Hager et al., 2014; Mancebo et al., 2015; Naqash et al., 2017; Paesani et al., 2020; Palavecino et al., 2019a; Rosell et al., 2014; Sciarini et al., 2012).

Dentro de los cereales utilizados se destacan el arroz, maíz, trigo sarraceno y sorgo, entre otros. Respecto al sorgo, el grano posee un alto contenido de almidón (~70%) y carece de gluten,

por lo tanto, la harina permite su utilización para la elaboración de productos horneados aptos para este tipo de dietas. Las principales proteínas de almacenamiento del grano de sorgo son las kafirinas, que se encuentran dentro de la familia de las prolaminas, pero son diferentes estructural y funcionalmente a las que contiene el trigo, por lo que no provocan inconvenientes en personas con intolerancia al gluten (Belton y Taylor, 2002). Sin embargo, un desafío importante en el uso del sorgo en la elaboración de productos que requieran retención de gas durante la cocción, es el manejo de las pobres propiedades viscoelásticas de estas proteínas, en comparación con las presentes en harinas de cereales con gluten (Taylor y Anyango, 2011).

Los bizcochuelos son productos populares que se elaboran principalmente con harina de trigo y se consumen en todo el mundo. Este tipo de torta contiene solo pequeños niveles de grasa, ya que en sus ingredientes no se encuentran la margarina, la manteca o el aceite, y la estructura de los batidos se puede describir como una espuma. Las recetas de tortas tipo espuma contienen principalmente harina, azúcar y huevos. Debido a la presencia de bajos niveles de grasa, parte de los ingredientes se pueden batir para formar una espuma líquida, es decir, un sistema que contiene una fase de aire dispersa en un líquido. Dado que estos sistemas son intrínsecamente inestables, es necesario estabilizar sus celdas de gas para evitar la coalescencia, la desproporción (maduración de Ostwald) y el ascenso de las burbujas (Dickinson, 2010). Esto generalmente se logra mediante el uso de componentes activos en la superficie, que disminuyen la tensión interfacial entre ambas fases (Wilde, 2000). Es importante incorporar tantas burbujas de aire como sea posible en la espuma durante la mezcla, ya que no se forman adicionales más adelante en el proceso (Godefroidt et al., 2019).

El proceso de elaboración de los bizcochuelos se puede realizar de dos maneras; mezclando todos los ingredientes en una sola etapa o en varias. Desde un punto de vista práctico, es beneficioso mezclar todos los ingredientes en un solo paso. De hecho, es posible agregar todos los ingredientes a la vez para formar una masa tipo espuma, pero esto requiere que se usen tensioactivos o emulsionantes (es decir, lípidos anfifílicos) para estabilizar la interfase aire-agua (Richardson et al., 2002).

En la mezcla de dos etapas, se baten por un lado el huevo con el azúcar para disolver esta última e incorporar aire y formar una espuma. Luego se incorporan la harina y el resto de los ingredientes (Conforti, 2014). Las celdas de gas en la masa se estabilizan por los componentes

tensioactivos, que están naturalmente contenidos en los ingredientes (proteínas y lípidos del huevo y la harina) y reducen el impacto de los procesos de desestabilización (Campbell et al., 2003).

Durante la fase inicial de horneado, la temperatura aumenta y la viscosidad del batido disminuye a medida que crecen las burbujas de gas debido a la expansión del aire. Además, el aumento de la temperatura disminuye la solubilidad del gas en la fase acuosa y los agentes leudantes (en caso de que se agreguen en la formulación) forman dióxido de carbono (CO_2) (Delcour y Hoseney, 2010; Godefroidt et al., 2019). Las altas temperaturas alcanzadas conducen a la gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas provocando un aumento de la viscosidad. La matriz del batido solidifica convirtiendo la masa líquida en una estructura sólida.

Debido a la producción de vapor de agua y dióxido de carbono, y expansión del aire, aumenta la presión dentro de las celdas de gas. Estas crecen rápidamente y, en cierto punto, las paredes de la celda de gas se rompen, se libera gas y la presión en las celdas abiertas cae. Si este fenómeno ocurre antes de que haya fraguado la estructura, se produce el colapso del bizcochuelo. La viscosidad de la masa debe permanecer lo suficientemente alta durante el horneado para minimizar la pérdida de celdas de gas. Si la viscosidad de la masa es demasiado baja, se puede esperar la pérdida de celdas de gas y la formación de depósitos de almidón (Godefroidt et al., 2019).

Un producto final con buena calidad se espera que tenga una corteza uniforme y fina, textura blanda, y miga uniforme, húmeda y de gran volumen. Estas características se ven fuertemente afectadas por la viscosidad y estabilidad del batido. Durante el proceso de batido de los ingredientes, se forman pequeñas celdas de aire, que contribuyen a lograr un mayor volumen, sólo si la fase continua puede retener estas celdas de aire durante el proceso de horneado (Choi y Baik, 2013).

Varios trabajos han indicado que el tamaño de partícula de la harina afecta la calidad de los bizcochuelos, y más específicamente, su volumen (Choi y Baik, 2013; de la Hera et al., 2013). Moiraghi et al., (2013) encontraron que menores tamaños de partículas de harina de trigo produjeron la formación de burbujas de aire más pequeñas y una mayor viscosidad del sistema durante su elaboración. Además, la presencia de burbujas más pequeñas y estables permite una mayor eficiencia en la retención de aire dentro de la microestructura, lo que conduce a mayores volúmenes de bizcochuelos. Resultados similares se han obtenido con harinas sin gluten, como la

harina de arroz, donde el volumen final de los bizcochuelos fue mayor cuando se utilizaron tamaños de partícula más pequeños (de la Hera et al., 2013).

Como se mencionó anteriormente, existe una creciente demanda por la diversificación de productos sin gluten. Por esta razón, otros cereales, como arroz, soja, mijo o cebada (de la Hera et al., 2013; Dhen et al., 2016) e ingredientes no tradicionales como plátanos, zanahorias u orujo de pera (Majzoobi et al., 2016; Rocha-Parra et al., 2018) han sido explorados para la producción de bizcochuelos. El uso de harina de sorgo en la formulación de bizcochuelos ha sido informada formando parte de mezclas con harina de garbanzo (Rizk et al., 2018) y arroz (Cayres et al., 2020). También Storck et al. (2021), utilizaron harina de sorgo sometida previamente a un proceso de fosforilación para mejorar sus propiedades mediante la modificación de la estructura del almidón. Sin embargo, no se encontró en la bibliografía analizada la utilización de 100% harina de sorgo sin modificación, para para la elaboración de bizcochuelos.

En este capítulo se describe la obtención de harinas de sorgo bajo condiciones de pulido y molienda descritas anteriormente. Parte de estas fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño (micronización) y posterior tamización a fin de conseguir fracciones de diferente tamaño de partículas. Las fracciones de harinas fueron caracterizadas y utilizadas para elaborar bizcochuelos libres de gluten. Finalmente se describe la caracterización de los batidos y bizcochuelos obtenidos.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1 Materiales

Se utilizaron dos híbridos comerciales de granos de sorgo: sorgo marrón (Gen 417) y blanco, ambos multipropósitos. La descripción de los granos utilizados se encuentra en el Capítulo 2, apartado 2.2.1.

4.2.2 Obtención de harinas para la elaboración de bizcochuelos

Se obtuvieron harinas de sorgo en base a las condiciones de molienda seleccionadas previamente (Capítulo 2). Se acondicionaron muestras de granos de sorgo limpios (2500 g de cada uno de los híbridos de sorgo) al ~12% de humedad, durante 24 h. Posteriormente, se pulieron los granos por abrasión durante 180 s, según experimentos previos, y el rendimiento de molienda fue de $69,4 \pm 0,5\%$.

Las muestras pulidas se sometieron a molienda de impacto según se describió anteriormente (Capítulo 2, apartado 2.2.4). Una fracción de harina (~ 1000 g) fue remolida en un molino ciclónico (FOSS Cyclotec™ 1093, España) donde las partículas son impulsadas por paletas que giran a alta velocidad contra un anillo abrasivo y luego pasan a través de una malla fina de 0,5 mm para obtener diferentes tamaños de partículas (proceso denominado micronización). Después del proceso de remolienda, una parte de cada muestra (~ 500 g) se tamizó (Bühler MLI 300B, Suiza) con una malla de 80 μm durante 20 min; y la fracción pasante (de menor tamaño de partícula) se separó y utilizó en los ensayos.

Además, una muestra de sorgo blanco entero se molió directamente por impacto para representar una muestra sin abrasión, grano entero (0 min) (WWS-IM). En este caso no se procesaron muestras de harina de sorgo marrón integral debido a su sabor altamente astringente (determinado en estudios previos), relacionado con el contenido de taninos.

Las muestras obtenidas fueron:

- Harina integral de sorgo blanco (**WWS-IM**) obtenida por molienda por impacto.
- Harinas de sorgo blanco (**PWS-IM**) y marrón pulido (sorgo Gen 417) (**PSG-IM**), ambas obtenidas por previo pulido del grano y molienda por impacto.
- Harinas de sorgo blanco (**PWS-HI**) y marrón pulido (**PSG-HI**) y micronizada, ambas fracciones obtenidas por pulido, molienda por impacto y ciclónica.
- Harina de sorgo blanco (**PWS-80**) y marrón pulido (**PSG-80**), micronizada y tamizada; ambas fracciones pasantes en la malla de 80 μm luego de su pulido, molienda por impacto y ciclónica.

4.2.3 Composición proximal

La determinación de humedad, cenizas, lípidos totales y proteínas (N x 6,25) se llevó a cabo mediante métodos estándar (AACC, 2010). La descripción de la evaluación del contenido de cenizas y humedad de las harinas encuentra detallada en el Capítulo 2, apartado 2.2.7. Los análisis se realizaron por duplicado y se expresaron como porcentaje (%) en base seca. Los carbohidratos totales (ChT) se calcularon por diferencia.

4.2.3.1 Lípidos totales

El contenido total de lípidos se determinó mediante una extracción continua sólido-líquido. Se utilizó hexano como solvente. Se pesaron 2 g de muestra en cartuchos de papel que luego se colocaron en un equipo Soxhlet. El contenido se cuantificó por diferencia de masa (Method 31.4.02 AOAC, 2000).

4.2.3.2 Proteínas

El contenido de nitrógeno se determinó por el Micro Método de Kjeldahl (Method 46-10 AACC 2010). Las muestras (100 mg de harina) se mineralizaron con 4 mL de H₂SO₄, en presencia de un catalizador (2,6 g Na₂SO₄ y 0,44 g CuSO₄). La reducción del nitrógeno orgánico a amoníaco fue retenida como bisulfato de amonio (NH₄HSO₄) y posteriormente destilado en medio básico, sobre ácido bórico. Finalmente, el amoníaco recolectado como NH₄H₂BO₄ se tituló con ácido clorhídrico. El contenido porcentual de proteínas totales se calculó según la ecuación 2.2:

$$Proteínas(\%) = \frac{VxNxFxPxM}{P} x 100 \quad (2.2)$$

Donde, V es volumen de HCl (mL), N es la concentración del HCl corregida, F es el factor de conversión para el nitrógeno a proteínas (6,25 para sorgo), PM masa de los miliequivalentes de nitrógeno (0,014) y P masa de la muestra (g).

4.2.4 Contenido de polifenoles totales

El contenido total de polifenoles (TPF) se cuantificó utilizando el ensayo de Folin-Ciocalteu de acuerdo a Pigni et al., (2020). El mecanismo del ensayo involucra una reacción redox entre el reactivo de Folin-Ciocalteu que contiene ácido fosfotúngstico y ácido fosfomolibdico que actúan como oxidantes, por lo que se reducen en presencia de los compuestos polifenólicos en las muestras a ensayar. Los ácidos reducidos a óxidos de tungsteno (W₈O₂₃) y molibdeno (Mo₈O₂₃) poseen un máximo de absorbancia a 750 nm.

En primer lugar, se extrajeron 100 mg de muestra (harina) con 1 mL de una mezcla de acetona/agua (70:30 v/v); se aplicó agitación en vortex durante 5 min a temperatura ambiente. Luego los extractos se centrifugaron (Gelec, Argentina) durante 10 min a 800 xg y se recogieron los sobrenadantes. Este proceso se repitió dos veces más y todos los sobrenadantes se combinaron, filtraron y almacenaron a -40 °C hasta su utilización.

Posteriormente, se colocaron 1,680 μL de agua ultrapura y 80 μL de la mezcla acetona:agua en un tubo de Khan, se añadieron 100 μL de muestra y luego se agregaron 100 μL del reactivo de Folin-Ciocalteu. La mezcla obtenida se agitó en un vortex (Decalab, Argentina). Luego de exactamente 1 min, se agregaron 300 μL de Na_2CO_3 al 20 % p/v y se agitó nuevamente. La mezcla se incubó 120 min a temperatura ambiente y en oscuridad. Finalmente se midió la absorbancia de la solución a 750 nm contra un blanco de reactivo procesado de la misma forma. Todas las muestras y los blancos fueron determinados por triplicado.

Para calcular el contenido de polifenoles totales (TPF) en las muestras, se construyó una curva de calibración utilizando ácido gálico como estándar. El rango de linealidad utilizado fue de 0,25 a 5,00 mg de ácido gálico/L.

Todas las determinaciones se realizaron al menos por duplicado y los resultados obtenidos para los extractos se expresaron como miligramos de polifenoles equivalentes al ácido gálico por 100 g de peso seco de muestra (mg EAG/100g muestra).

4.2.5 Almidón dañado

El contenido de almidón dañado (AD) se determinó según el método AACC 76-30A (AACC, 2010). Se utilizó una α -amilasa fúngica de *Aspergillus oryzae* (A6211, Sigma Chemical Co., EUA) para producir la hidrólisis del almidón susceptible. El ensayo se basa en dos etapas, la primera envuelve la digestión con dicha enzima y la segunda corresponde a la titulación de los azúcares reductores resultantes.

Se suspendió un 1,00 g de harina (14% de humedad) y 0,05 g de α -amilasa en 45 mL de buffer acetato (pH 4,6) y se incubó a 30°C durante 20 minutos. Posteriormente se filtró y tomó una alícuota para la determinación de los azúcares reductores mediante titulación con tiosulfato de sodio siguiendo las indicaciones del método. Finalmente se utilizó la tabla propuesta en este método para transformar los azúcares reductores determinados en almidón dañado expresado como porcentaje (gramos de almidón dañado por cada 100 g de muestra). Los análisis se realizaron por duplicado.

4.2.6 Capacidad de retención de agua (WRC)

Este método evalúa la capacidad que posee una harina de retener agua destilada en función de sus componentes hidrofílicos. Se pesaron muestras de harina de sorgo (P_m , 500 ± 5 mg) en tubos de centrifuga de 15 ml. Luego, se agregaron 6 mL de agua a las muestras, las cuales se incubaron a 25°C durante 30 minutos con agitación realizada a los 0, 10, 20 y 30 minutos (Rodríguez-Sandoval et al., 2012). Después de eso, los tubos se centrifugaron (20 min a $3000 \times g$) y luego se invirtieron sobre papel absorbente para drenar el exceso de líquido. Finalmente, se pesó el gel (P_g) y se calculó WRC de la siguiente manera:

$$WRC = \frac{P_g}{P_m} \quad (2.3)$$

Los análisis se realizaron por duplicado.

4.2.7 Perfiles de viscosidad

El perfil de viscosidad de las muestras se determinó utilizando un analizador de viscosidad rápida (RVA serie 4500, Perten Instruments, EUA) siguiendo el procedimiento descrito por Palavecino et al. (2016), según se mencionó en el Capítulo 2, apartado 2.2.10. Los análisis se realizaron por duplicado.

4.2.8 Análisis de tamaño de partículas

El análisis del tamaño de partículas de las harinas se realizó mediante un instrumento de difracción de luz láser Horiba (LA 960, Japón). La descripción del ensayo se encuentra detallada en el Capítulo 2 apartado 2.2.9.

4.2.9 Elaboración de los bizcochuelos

Los bizcochuelos se elaboraron siguiendo la siguiente formulación: harina de sorgo (122,5 g), huevo líquido pasteurizado (172,0 g), azúcar (120,3 g), leche en polvo (12,5 g), emulsionante (SuperMixo T500, Puratos Gerona, España) (7,0 g) y agua (27,5 ml).

Se utilizó un procedimiento de dos pasos, según describió de la Hera et al. (2013). Inicialmente se mezclaron todos los ingredientes, excepto la harina y la leche, utilizando una batidora Kitchen-Aid Professional (Kitchen Aid, EUA) durante 2 min a velocidad 6. Posteriormente, se incorporó la leche y la harina, y se continuó el proceso de mezclado durante 3 min a velocidad 8. Finalmente, se colocó el batido (150 g) en moldes de aluminio desechables recubiertos de aceite (109 × 159 × 38 mm) y se llevó a un horno eléctrico por 30 min a 190 °C. Las muestras fueron preparadas por duplicado y se obtuvieron tres piezas de cada formulación.

4.2.10 Caracterización de los batidos

Las propiedades de los batidos se midieron inmediatamente después de la preparación, sobre dos muestras independientes de cada formulación. Para determinar la densidad se rellenó un recipiente estándar (100 cm³) de peso conocido y se calculó la relación entre el peso (g) de la muestra y el volumen estandarizado. La viscosidad de los batidos se midió con un Rapid Visco Analyzer (Newport Scientific Pty Ltd., Australia). Se tomaron de (20 g) de cada formulación y se sometieron a agitación durante 5 min utilizando una velocidad constante de 160 rpm y una temperatura de 30 °C según Dhen et al. (2016).

4.2.11 Análisis microscópico de los batidos

Con intención de visualizar las burbujas de aire incorporadas durante el batido, se colocó una pequeña gota de este en un portaobjetos para microscopía óptica (MO). La muestra se cubrió cuidadosamente con otro portaobjetos para evitar la inclusión de burbujas de aire exógenas. Ambos vidrios se comprimieron bajo un peso de 1 kg para crear una capa de espesor uniforme. Las muestras se examinaron con una magnificación de 20 veces (20x), utilizando un microscopio

DM750 (Leica Microsystems, Alemania) equipado con una cámara de vídeo EC3. Las imágenes fueron capturadas usando el software LAS EZ (Leica Microsystems, Alemania).

Para el análisis de la distribución de tamaño de las burbujas de aire incorporadas al batido se obtuvieron imágenes en formato de archivo TIFF y se evaluaron con el programa de análisis de imágenes Image-J 1.48a (National Institutes of Health, Estados Unidos). Las imágenes de colores se convirtieron a imágenes de 8-bits y se analizaron en escala de grises (0 negro, 255 blanco) (Figura 4.1). Las imágenes seleccionadas fueron segmentadas por un valor de gris para crear imágenes binarias mediante el algoritmo Iso-Data (Rasband, 2009). De este modo, todos los píxeles con nivel de gris por debajo del umbral se mostraron en negro y fueron considerados objetos (burbujas) y los píxeles con nivel de gris por encima del umbral se mostraron en blanco y fueron considerados componentes de la suspensión.

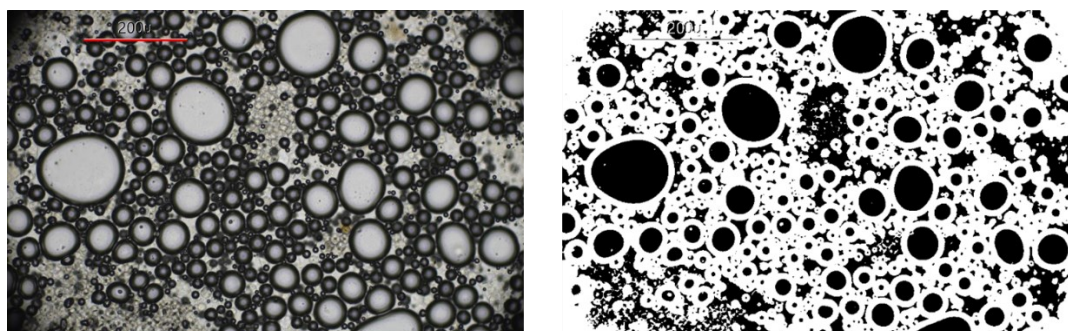


Figura 4.1. Análisis de imágenes de batidos obtenidas por MO utilizando el software Image J 1.48a.

El análisis de las imágenes permitió obtener los siguientes parámetros:

- Número de burbujas en la superficie de la microfotografía (1000 x 800 μm).
- Tamaño promedio de la burbuja: área promedio de las burbujas en μm^2 .
- Fracción de área, FA: relación entre el área total ocupada por alveolos y el área total seleccionada.

Las imágenes fueron analizadas por duplicado y los datos resultantes fueron analizados mediante el software estadístico InfoStat.

4.2.12 Caracterización de los bizcochuelos

La evaluación de las propiedades del bizcochuelo se realizó a las 24 h del horneado como se reporta en (Gómez et al., 2007). Se determinaron las siguientes propiedades:

4.2.12.1 Volumen específico

El volumen de los bizcochuelos se determinó usando un sensor láser con el sistema Volscan Profiler (Stable Micro Systems, Reino Unido) (Figura 4.2). El volumen específico se calculó como la relación entre el volumen del bizcochuelo y su masa. Las medidas se realizaron sobre tres bizcochos.

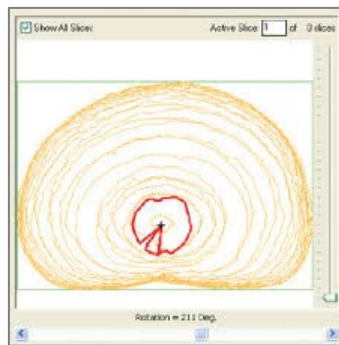


Figura 4.2. Imagen característica construida con el sistema Volscan Profiler.

4.2.12.2 Textura

La textura de la miga se midió con un analizador de textura TA-XT2 equipado con el software Texture Expert (Stable Microsystems, Reino Unido) equipado con una celda de compresión de 25 kg. Se utilizó una sonda cilíndrica de aluminio de 25 mm de diámetro y se llevó a cabo una prueba de doble compresión (Análisis de perfil de textura, TPA). Los parámetros de ensayo fueron: velocidad del cabezal 2 mm/s y deformación máxima de 50% y tiempo de descanso entre la primera y segunda compresión 30 s.

Luego del horneado, los bizcochuelos se dejaron enfriar por 2 h y fueron almacenados en bolsas de polietileno termoselladas a 25°C hasta su utilización en el ensayo. Se obtuvieron y

analizaron 2 rodajas (20 mm de espesor) de la parte central de los bizcochuelos, y se las llevó al texturómetro donde fueron sometidas a un doble ciclo de compresión-descompresión para obtener la gráfica de fuerza de compresión versus tiempo (Figura 4.3). Mediante el software Texture Expert 1.22 (Stable Microsystems, Reino Unido) se determinaron los siguientes parámetros:

- Firmeza de la miga (F): es la fuerza, en g o newton, requerida para comprimir una rodaja de pan hasta un 50% del espesor original (Método 74-09, AACC, 2010). El valor de fuerza máxima del primer ciclo de compresión (Área 1) coincide con la dureza o firmeza.
- Cohesividad (Chv): se relaciona con la “Fuerza” de los enlaces internos que mantiene la estructura de una muestra (Szczeniak, 1963). Representa la resistencia de un material a una segunda deformación con relación a como este se comportó en un primer ciclo de deformación. Se calcula como el cociente entre el trabajo realizado en la segunda (Área 2) y la primera compresión (Área 1).
- Masticabilidad (M): parámetro relacionado con la cantidad de energía o fuerza requerida para desintegrar el alimento sólido hasta ser deglutido (Szczeniak, 1963). Se determina como el producto entre la Firmeza, la Cohesividad y la Elasticidad (definida como el cociente entre Distancia 2/ Distancia1).

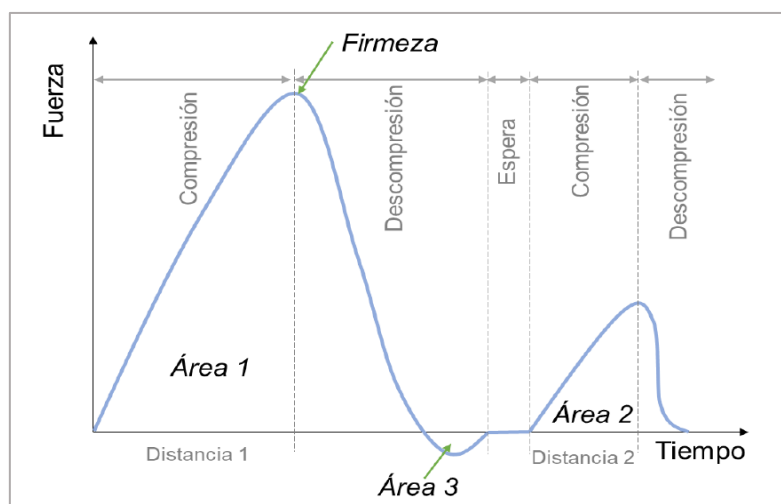


Figura 4.3. Curva típica de un análisis de perfil de textura.

(Tomado de Palavecino, 2019)

4.2.13 Análisis sensorial

La evaluación de los bizcochuelos fue realizada por un grupo focal. Generalmente este tipo de grupos se componen de 5 a 10 encuestados reclutados para adaptarse a características demográficas, de actitud y de uso específicas. La discusión está dirigida por un moderador capacitado que tiene experiencia en técnicas de entrevistas grupales y tiene suficiente conocimiento del producto en discusión. El método de grupo focal aprovecha el concepto de dinámica de grupo, donde la discusión tiende a ser estimulada por el intercambio de comentarios (Galvez y Resurrección, 1992).

En este trabajo el grupo focal fue conformado por cinco expertos entre 24 y 60 años. Las características evaluadas fueron apariencia, textura, sabor y diferencias sensoriales entre muestras. La elección de este método se debió principalmente a la menor cantidad de muestra necesaria para el ensayo y la posibilidad de contar con jueces entrenados. Las sesiones se llevaron a cabo en una sala con aire acondicionado lo suficientemente grande como para ubicar cómodamente a los integrantes. La habitación estaba equipada con luces fluorescentes y libre de elementos ambientales que distorsionaran las percepciones normales. Los participantes se sentaron alrededor de una mesa rectangular para permitir la discusión libre y tener una superficie para escribir. El moderador y los participantes se presentaron al grupo para comenzar a construir una atmósfera cómoda y amistosa. El moderador discutió, brevemente, los objetivos de la sesión. Se advirtió a los participantes que no había respuestas correctas o incorrectas solo debían expresar de manera honesta sus pensamientos y sentimientos durante las evaluaciones, junto al uso términos específicos tanto como fuera posible (Galvez y Resurrección, 1992).

Inicialmente se le presentaron a los expertos bizcochuelos enteros para que analicen la apariencia externa. Posteriormente se utilizaron rebanadas de dos cm de cada bizcochuelo para analizar las características restantes (textura, sabor y diferencias sensoriales entre muestras). Cada participante recibió muestras codificadas con tres números y se le pidió escribir la evaluación completa en un papel. Finalmente, se pusieron en común todas las notas y se enumeraron las observaciones finales.

4.2.14 Análisis estadístico

Los datos fueron tratados estadísticamente mediante el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2015). Todos los ensayos se realizaron al menos por duplicado y se informó el promedio \pm desvío estándar. Los resultados obtenidos fueron evaluados estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA). En el caso de presentar diferencias, la comparación de las medias se realizó mediante el test de Fisher (LSD) con un nivel de significancia de 0,05. La relación entre los distintos parámetros fue determinada mediante el coeficiente de correlación de Pearson con $p \leq 0,05$. Todos los gráficos se obtuvieron utilizando el software Excel (Microsoft Office 365).

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1 Composición proximal y propiedades de hidratación de las harinas

La Tabla 4.1 muestra el efecto del pulido de los granos y su molienda sobre la composición química de la harina de sorgo. El pulido disminuyó el contenido de lípidos y cenizas del sorgo blanco (PWS-IM) respecto a las muestras integrales (WWS-IM), como era esperado debido a la eliminación parcial de la fracción de salvado. En general, PWS-IM exhibió un contenido similar de proteínas, lípidos y cenizas en comparación con la harina de sorgo marrón pulido (PSG-IM). Estos resultados se encontraron en los rangos de valores informados en un trabajo anterior, donde se evaluaron veinte híbridos comerciales de sorgo de la región central de Argentina (Palavecino et al., 2016).

El tamizado de las harinas permitió obtener muestras con un menor tamaño de partículas (PSG-80 y PWS-80). Este proceso no provocó una reducción significativa del contenido de cenizas. Sin embargo, las harinas pasantes del tamiz de 80 μm presentaron un contenido de proteínas significativamente menor que el resto de las muestras. Las partículas más pequeñas que pasaron por el tamiz probablemente provinieron de partes internas del grano con menor contenido de proteína, como el endospermo harinoso. Como ya se mencionó las proteínas se encuentran en el endospermo harinoso, pero en cantidades mucho más pequeñas que en el pericarpio o en las áreas del endospermo córneo y periférico (Rooney y Murty, 1981).

El sorgo posee diversos compuestos fitoquímicos, como taninos, ácidos fenólicos y antocianos; que son reconocidos por su actividad antioxidante y potencial efecto en la salud humana (Awika, Rooney, et al., 2005). En este caso se cuantificaron los polifenoles totales y los resultados se expresaron en mg de ácido gálico por cada 100 g de harina (Tabla 4.1). El contenido de polifenoles totales (TPF) mostró una amplia variación, oscilando entre 27,91 y 138,81 mg/100 g, siendo los mayores valores para harinas provenientes de sorgo marrón. Sin embargo, todas las muestras se encontraron debajo del límite establecido el Codex Alimentarius para el contenido de taninos en la harina de sorgo, situado en 0,3% (bs). Valores similares fueron reportados por Rao et

al. (2018), quienes demostraron que las harinas de sorgo marrón tuvieron valores más altos que las de sorgo blanco. En este estudio, PSG-80 presentó valores significativamente más bajos de polifenoles totales que las harinas de sorgo marrón no tamizadas (PSG-IM y PSG-HI), que se relacionó con una disminución en su contenido de salvado (Awika y Rooney, 2004). Por otra parte, las harinas de sorgo blanco pulido (PWS-IM, PWS-HI y PWS-80) no mostraron diferencias significativas, sin embargo, tuvieron TPF más bajos que la WWS-IM.

El contenido de almidón dañado (AD) aumentó alrededor de 2,8 y 2,5 veces luego del proceso de micronización en las muestras harina de sorgo blanco y marrón respectivamente (PWS-HI, PSG-HI). Estas muestras y también las tamizadas (PWS-80 y PSG-80) presentaron un poder de retención de agua (WRC) significativamente mayor, relacionado con el menor tamaño de partícula (Kim y Shin, 2014) y mayor contenido de almidón dañado (Dayakar Rao et al., 2016; Trappey et al., 2015). El AD está principalmente relacionado con la dureza del grano y el daño mecánico ocurrido durante la molienda (Tester, 1997), por ello es esperable que su contenido sea mayor en las muestras que fueron sometidas a procesos de remolienda a fin de obtener menores tamaños de partículas. El AD posee una mayor capacidad de absorción de agua en comparación con el almidón nativo, y esto puede afectar la viscosidad de las suspensiones de almidón incluso sin calentamiento (Barrera et al., 2013).

Tabla 4.1. Caracterización de harinas para la elaboración de bizcochuelos.

Muestra	H (%)	Proteínas (%)	Lípidos (%)	Cenizas (%)	ChT (%)	TPF, (mg GAE/100 g)	WRC (%)	AD (%)
WWS-IM	7,92 ± 0,07 ^c	11,94 ± 0,30 ^b	4,57 ± 0,01 ^c	1,45 ± 0,02 ^b	74,12	57,86 ± 4,94 ^b	2,51 ± 0,03 ^a	8,90 ± 0,21 ^a
PWS-IM	7,43 ± 0,03 ^b	11,74 ± 0,21 ^b	3,32 ± 0,13 ^{ab}	0,64 ± 0,02 ^a	76,88	27,29 ± 0,75 ^a	2,51 ± 0,04 ^a	10,21 ± 0,29 ^b
PWS-HI	7,40 ± 0,02 ^b	10,93 ± 0,31 ^b	3,08 ± 0,08 ^a	0,63 ± 0,01 ^a	77,97	31,27 ± 0,46 ^a	2,97 ± 0,08 ^b	28,95 ± 0,00 ^c
PWS-80	7,07 ± 0,06 ^a	8,46 ± 0,21 ^a	3,54 ± 0,13 ^b	0,64 ± 0,01 ^a	80,30	27,91 ± 1,41 ^a	3,17 ± 0,08 ^b	31,20 ± 0,12 ^d
PSG-IM	7,90 ± 0,01 ^c	10,80 ± 0,56 ^b	3,20 ± 0,15 ^a	0,67 ± 0,01 ^a	77,44	211,06 ± 0,20 ^c	2,61 ± 0,03 ^a	7,87 ± 0,01 ^a
PSG-HI	7,39 ± 0,05 ^b	10,57 ± 0,26 ^b	3,69 ± 0,14 ^{ab}	0,68 ± 0,01 ^a	77,68	138,81 ± 1,61 ^b	2,85 ± 0,03 ^b	19,43 ± 0,01 ^b
PSG-80	6,92 ± 0,03 ^a	8,78 ± 0,06 ^a	3,96 ± 0,00 ^b	0,66 ± 0,01 ^a	79,69	94,42 ± 5,56 ^a	2,93 ± 0,02 ^b	19,76 ± 0,82 ^b

Letras diferentes entre harinas de sorgo blanco y entre harinas de sorgo marrón respectivamente en la misma columna expresan diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido, PSG: harina de sorgo Gen 417 pulido, IM: molienda por impacto, HI: muestras molidas con molino ciclónico, 80: muestras tamizadas de 80 μm , H (%): Humedad, ChT: carbohidratos totales, TPF: polifenoles totales (mg de equivalentes de ácido gálico), WRC: capacidad de retención de agua, AD: almidón dañado.

4.3.2 Distribución de tamaño de partículas de las harinas

El tamaño de partícula promedio de las harinas obtenidas de la molienda de granos influye principalmente en sus propiedades de absorción de agua, solubilidad y el valor nutricional. La reducción del tamaño de los granos mediante la molienda aumenta la relación de área superficial por unidad de volumen, lo que puede mejorar la tasa de digestión y fermentación de macronutrientes (carbohidratos, proteínas) en el tracto digestivo (Al-Rabadi et al., 2009). Además, como se mencionó anteriormente el tamaño de partículas de las harinas tiene una gran influencia en las características de los productos panificados, especialmente en aquellos que no poseen las proteínas que conforman el gluten y por ende son incapaces de formar una estructura que favorezca la retención de aire durante el horneado (Dhen et al., 2016). El diámetro volumétrico medio (D_{4,3}) y el D₉₀ disminuyeron gradualmente a medida que los granos fueron molidos, remolidos y tamizados para obtener harinas (Tabla 4.2). Del mismo modo, Al-Rabadi et al., (2012) reportaron una amplia distribución del tamaño de partícula en harinas de sorgo obtenidas por molienda de martillos (impacto). Todas las muestras presentaron una distribución bimodal, tal como era esperado según ensayos previos (Capítulo 2, apartado 2.3.2), a excepción de PWS-80 y PSG-80 debido a que estas muestras corresponden al tamizado de la harina, lo que provocó la exclusión de prácticamente todas las partículas mayores a 80 μm (Figura 4.4).

El patrón de distribución de tamaño de partículas (PSD) de WWS-IM exhibió un pico a $\sim 680 \mu\text{m}$, lo que sugirió la existencia de partículas formadas por una matriz proteica compuesta por gránulos de almidón y fracciones de salvado. A su vez, se observó un pico de menor tamaño de $\sim 26 \mu\text{m}$, que indica la presencia de una fracción de gránulos de almidón (Benmoussa et al., 2006). PWS-IM presentó un patrón de PSD similar al de WWS-IM, pero mostró una proporción ligeramente mayor de partículas más pequeñas (Figura 4.1a). Esto se atribuyó a una mayor cantidad de salvado en WWS-IM, que posee una textura más tenaz, lo que resulta en una molienda menos eficiente. PSG-IM evidenció un PSD similar a las harinas de sorgo blanco (Figura 4.4b).

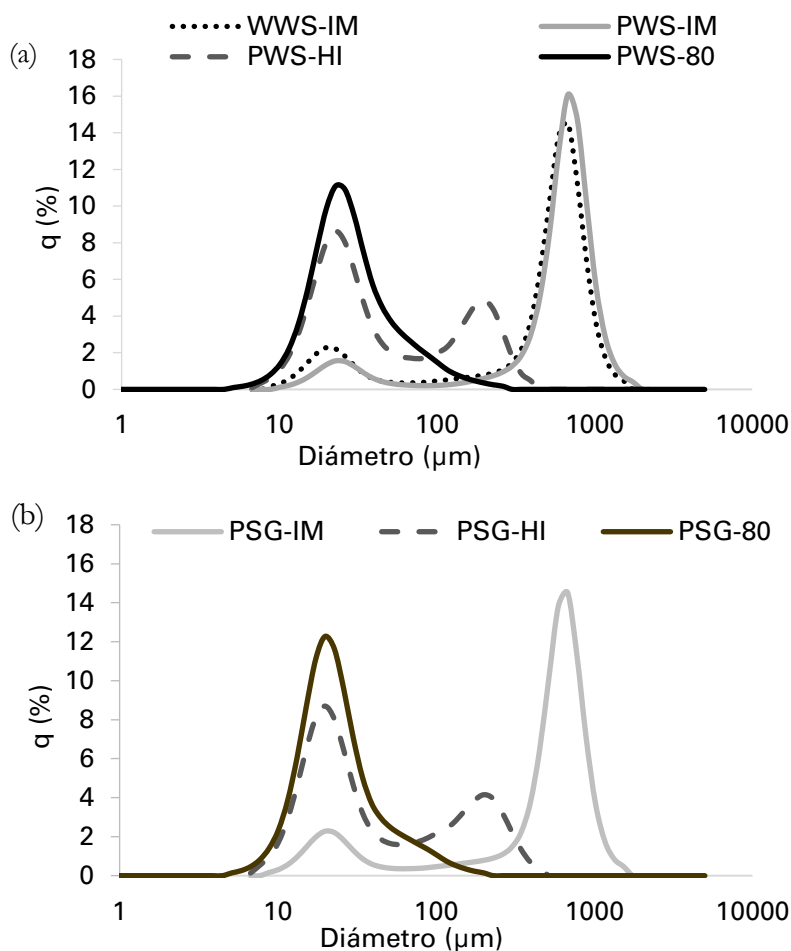


Figura 4.4. Patrones de distribución de tamaño de partícula de las harinas de sorgo blanco (a) y marrón (b).

WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido, PSG: harina de sorgo Gen 417; IM: molienda por impacto; HI: muestras molidas con molino ciclónico, 80: muestras tamizadas de 80 μm .

Los patrones PSD de las harinas obtenidas por molienda ciclónica (PWS-HI y PSG-HI) (Figura 4.4 a y b) exhibieron un pico alrededor de 21 μm y uno más pequeño de alrededor de 200 μm . Los patrones de PSD de PWS-80 y PSG-80 exhibieron un pico alrededor de 21 μm y un hombro de alrededor de 70 μm , lo que se relacionó con el tamaño del tamiz utilizado (80 μm).

Tabla 4.2. Parámetros de distribución del tamaño de partícula de las harinas de sorgo blanco y marrón.

Muestra	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	D4,3 (µm)	Span
WWS-IM	26,8 ± 1,1 ^c	553 ± 3,4 ^b	886,7 ± 1,5 ^c	524,5 ± 4,6 ^c	1,56 ± 0,0 ^{ab}
PWS-IM	43,7 ± 0,5 ^d	616,5 ± 13,1 ^c	923,1 ± 8,2 ^d	591,5 ± 12,1 ^d	1,43 ± 0,0 ^a
PWS-HI	22,7 ± 0,2 ^b	31,5 ± 1 ^a	211,5 ± 8,0 ^b	79,2 ± 3,6 ^b	6,26 ± 0,1 ^c
PWS-80	13,5 ± 0,1 ^a	24,2 ± 0,6 ^a	59,7 ± 5,2 ^a	32,2 ± 1,7 ^a	1,9 ± 0,2 ^b
PSG-IM	18,1 ± 0,2 ^c	279,2 ± 2,8 ^b	445,1 ± 1,4 ^c	263,3 ± 16,5 ^c	1,63 ± 0,0 ^a
PSG-HI	12,9 ± 0,0 ^b	27,3 ± 0,2 ^a	209,4 ± 4,0 ^b	75,4 ± 0,7 ^b	7,19 ± 0,2 ^b
PSG-80	11,7 ± 0,1 ^a	20,5 ± 0,0 ^a	51,8 ± 0,2 ^a	27,4 ± 0,0 ^a	1,96 ± 0,0 ^a

Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 2). Letras diferentes en la misma columna para la misma variedad de sorgo, expresan diferencias significativas (p<0,05). WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido, PSG: harina de sorgo Gen 417 pulido; IM: molienda por impacto; HI: muestras molidas con molino ciclónico, 80: muestras tamizadas de 80 µm. D4,3: diámetro medio basado en volumen. D10, D50, D90: diámetros donde el 10%, 50% y 90% de la población de partículas se encuentran por debajo de estos valores, respectivamente. Span: índice de polidispersidad.

Estos resultados nos permiten confirmar las diferencias existentes entre los métodos de reducción de tamaño. En el molino de impacto, la trituration tiene lugar en una cámara transversal a través de fuerzas de impacto, fricción y cizallamiento. La muestra se tritura entre el batidor transversal y los dientes del inserto de molienda. La malla utilizada durante la molienda determina el tamaño de las partículas finales. Por lo general, durante el severo impacto aleatorio, las superficies de las partículas pierden su suavidad y uniformidad (Dey et al., 2013). Por el contrario, las partículas molidas con el molino ciclónico son empujadas contra un anillo abrasivo por un impulsor giratorio de alta velocidad y luego pasan a través de una malla fina. Esto permite la obtención de partículas de menor tamaño con una distribución relativamente estrecha (Lazaridou et al., 2018).

4.3.3 Propiedades de *pasting* de las harinas

La obtención de perfiles de viscosidad para analizar las propiedades de *pasting* de las harinas resulta útil a fin de ensayar la aptitud de los ingredientes para la formulación de alimentos. Estos parámetros son influenciados principalmente por las propiedades del almidón. Es reconocido que un aumento de la viscosidad se atribuye a dos procesos principales: hinchamiento del gránulo y lixiviación de la amilosa. En general, se requiere una alta viscosidad para que los bizcochuelos

alcancen un mayor volumen debido a que esto permite una difusión de gas y migración de burbujas hacia la superficie más lenta y además previene la sedimentación de los gránulos de almidón (Godefroidt et al., 2019).

En los bizcochuelos, se puede suponer que los gránulos de almidón (dañados) compiten con el almidón nativo, la sacarosa y las proteínas por el agua. Esto presumiblemente limita la porción de agua disponible para la hidratación del almidón y afecta la viscosidad de la masa (Moiraghi et al., 2013).

Los gránulos de almidón contribuyen a la estabilidad de la interfaz aire-agua de la masa del bizcochuelo (Lam et al., 2014) y funcionan como una barrera física entre las celdas de gas aumentando su estabilidad (Godefroidt et al., 2019). Durante el horneado, los gránulos de almidón absorben mayores cantidades de agua que a temperatura ambiente. En exceso de agua, estos se hinchan, los cristales de amilopectina se funden, la amilosa puede lixiviarse fuera de los gránulos y la estructura supramolecular de los gránulos se pierde irreversiblemente. Estos fenómenos se relacionan con la gelatinización del almidón (Delcour y Hoseneey, 2010). El rango de temperatura a la que tienen lugar estas transiciones se denomina temperatura de gelatinización, T_m . En exceso de agua, la gelatinización del almidón de trigo ocurre entre 50 y 57 °C (Delcour y Hoseneey, 2010). Sin embargo, la gelatinización del almidón en los bizcochuelos ocurre a temperaturas más altas (alrededor de 80 a 95 °C) ya que está fuertemente influenciada por la presencia de sacarosa (Delcour y Hoseneey, 2010; Perry y Donald, 2002). Una vez que ha comenzado la gelatinización del almidón los gránulos se hinchan rápidamente y aumentan su tamaño más que en productos de panadería que contienen menor cantidad de sacarosa, como por ejemplo, pan (Perry y Donald, 2002).

Según Gómez et al. (2010), durante el horneado, el almidón necesita hincharse hasta un grado que asegure el contacto entre los gránulos. En ese punto, la viscosidad aumenta y se rigidiza la matriz. Finalmente, durante el enfriado y almacenamiento, ocurre la retrogradación de la amilosa primero, y la amilopectina más tarde, pasando de un estado totalmente amorfo a uno parcialmente cristalino. La formación de estos cristales, junto con la redistribución de agua asociada, contribuye al aumento de la dureza de la miga.

El perfil de *pasting* de las harinas en agua destilada se vio afectado por el tipo de sorgo y los procesos para obtener las harinas (Figura 4.5). Los valores característicos de las curvas se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Propiedades de *pasting* de las harinas de sorgo utilizadas en la elaboración de bizcochuelos.

Muestra	PV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)
WWS-IM	984 ± 1 ^a	31 ± 0 ^a	1.996 ± 1 ^a	1044 ± 0 ^a	88 ± 1 ^g
PWS-IM	1315 ± 11 ^b	40 ± 4 ^a	2.404 ± 43 ^b	1129 ± 50 ^b	86 ± 1 ^f
PWS-HI	2515 ± 17 ^d	848 ± 8 ^c	3.216 ± 9 ^d	1550 ± 1 ^d	77 ± 1 ^d
PWS-80	3086 ± 14 ^e	1467 ± 6 ^d	3.480 ± 22 ^e	1861 ± 1 4 ^e	75 ± 1 ^c
PSG-IM	1849 ± 5 ^c	378 ± 0 ^b	2.777 ± 1 ^c	1306 ± 5 ^c	79 ± 1 ^e
PSG-HI	3126 ± 35 ^e	1509 ± 18 ^e	3.178 ± 32 ^d	1561 ± 15 ^d	72 ± 1 ^a
PSG-80	3575 ± 26 ^f	1659 ± 9 ^f	4.080 ± 21 ^f	2189 ± 11 ^f	73 ± 1 ^b

Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 2). Letras diferentes en la misma columna expresan diferencias significativas (p<0,05). WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido, PSG: harina de sorgo Gen 417 pulido; IM: molienda por impacto; HI: muestras molidas con molino ciclónico, 80: muestras tamizadas de 80 µm. PV: pico de viscosidad; BD: viscosidad de ruptura; FV: viscosidad final; SB: retrogradación; PT: temperatura pico.

En general, las harinas parcialmente refinadas mostraron una viscosidad más alta que la harina integral durante todo el ciclo de calentamiento y enfriamiento, y los valores más altos los tuvieron las harinas molidas y micronizadas, es decir, mientras menor fue el tamaño de partícula mayores fueron las viscosidades de las mezclas. La temperatura de *pasting* (PT) disminuyó a medida que se redujo el tamaño de partícula de las harinas. Las muestras de harinas micronizadas (PWS-HI y PSG-HI) y tamizadas de 80 µm (PWS-80 y PSG-80) exhibieron los valores más bajos. Los valores de viscosidad máxima (PV) y final (FV) aumentaron a medida que se redujo el tamaño medio de partícula (p<0,05) (Tabla 4.3).

La caída de la viscosidad por la fuerza de cizalla (BD) fue notable en harinas obtenidas por molienda ciclónica y tamizadas de 80 µm, mientras que esto ocurrió en menor grado en aquellas pulidas y molidas por impacto (PWS-IM y PSG-IM). Los valores de *setback* (SB) aumentaron gradualmente a medida que disminuyó el tamaño de las partículas (Tabla 4.3).

Los valores promedio para todos los parámetros representativos del proceso de *pasting* de las harinas de sorgo analizadas fueron similares a los informados por Palavecino et al. (2016) para distintos híbridos de sorgos. Sin embargo, perfiles de *pasting* con valores significativamente menores fueron reportados por Sun et al. (2014), pero en este caso los autores realizaron una molienda húmeda y las muestras fueron posteriormente secadas.

Los resultados encontrados en este estudio indican que la reducción del tamaño de partícula permitió que los gránulos de almidón se hinchen más rápido y en mayor medida durante el calentamiento. También, se destaca una mayor viscosidad en las muestras pulidas lo que se relaciona con el mayor contenido de carbohidratos totales y almidón. De acuerdo con estos resultados, PV mostró una correlación inversa con el contenido de proteína ($r = -0,84$; $p < 0,001$) y una relación directa con el contenido de carbohidratos ($r = 0,81$; $p < 0,001$).

Tanto el retraso del inicio del pico de gelatinización, como la baja viscosidad durante el calentamiento en harinas con partículas de mayor tamaño, pueden atribuirse en parte a la mayor cantidad de proteína y estructura de la pared celular del endospermo, que retrasan y previene el hinchamiento y la ruptura del gránulo de almidón, lo que estabiliza la pasta de almidón (Hasjim et al., 2013). En nuestro estudio, la reducción del tamaño de las partículas pareció debilitar los efectos estructurales de las paredes celulares y las proteínas en las propiedades de *pasting* de la harina con el consecuente aumento de la viscosidad. Se obtuvieron correlaciones negativas significativas entre el diámetro volumétrico medio (D_{4,3}) con PV ($r = -0,93$; $p < 0,001$) y FV ($r = -0,87$; $p < 0,001$). En el mismo sentido, Hasjim et al. (2013) describen que las partículas de mayor tamaño tienen una mayor barrera física a la transferencia de calor, como lo indicó el mayor la PT y, de manera similar, una mayor barrera a la difusión o penetración del agua, que aquellas con partículas de menor tamaño. Otros autores también señalaron que el tamaño de las partículas influyó en gran medida en las características de *pasting* de las harinas (Al-Rabadi et al., 2012; Dayakar Rao et al., 2016; Hasjim et al., 2013).

Las muestras micronizadas, presentaron valores significativamente superiores de almidón dañado (DS) y menores PT ($r = -0,64$; $p < 0,01$). Generalmente, los gránulos de almidón dañados, que contienen una estructura cristalina parcialmente alterada, tienen una temperatura de gelatinización más baja que aquellos intactos (Chen et al., 2003; Dhital et al., 2011). A su vez los valores significativamente superiores de BD ($r = 0,72$; $p < 0,001$) y SB ($r = 0,67$; $p < 0,01$) están

relacionados con una baja integridad de los gránulos y una mayor lixiviación de amilosa, lo que sugiere una menor estabilidad de los gránulos en estas muestras.

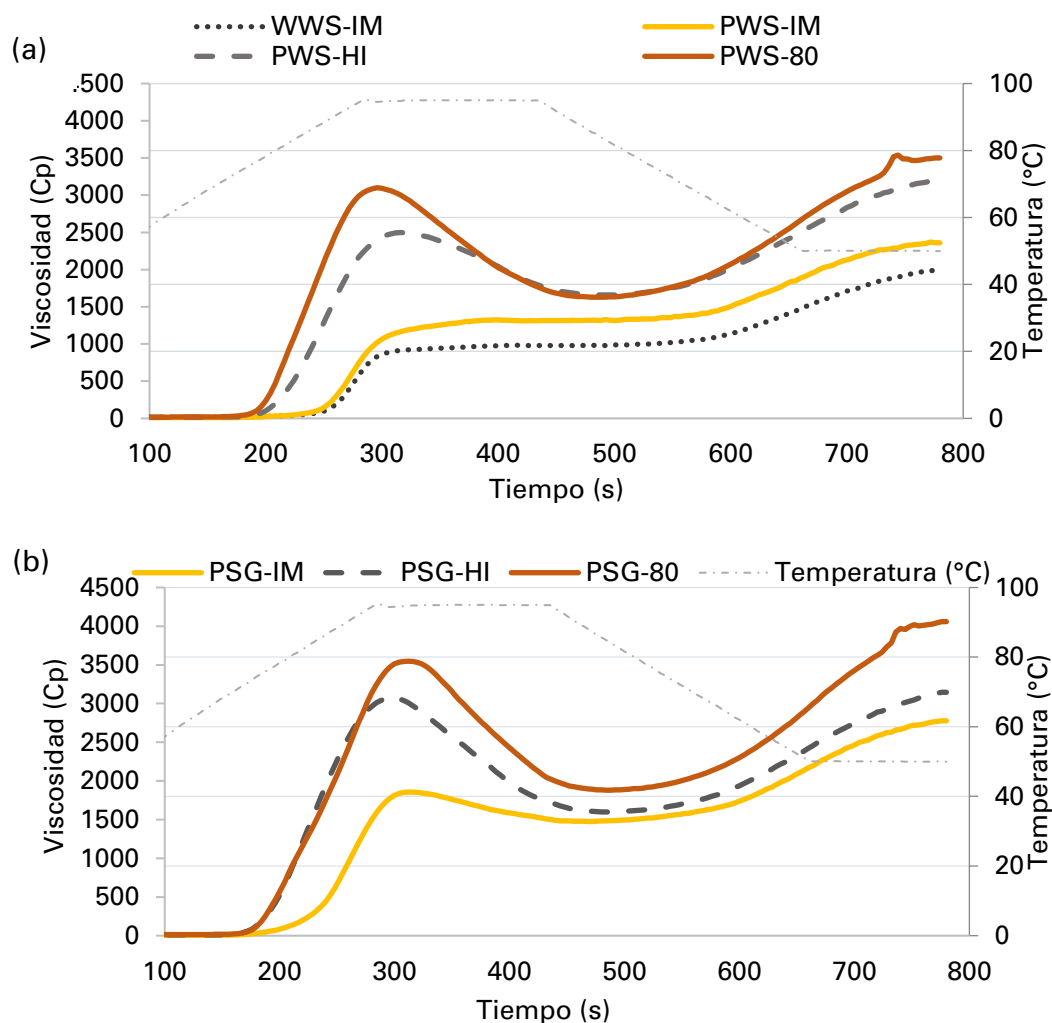


Figura 4.5. Propiedades de pasting de harinas de sorgo blanco (a) y sorgo marrón (b) suspendidas en agua destilada.

WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido, PSG: harina de sorgo Gen 417 pulido; IM: molienda por impacto; HI: muestras molidas a con molino ciclónico, 80: muestras tamizadas de 80 μm .

4.3.4 Caracterización de batidos y bizcochuelos

El análisis microscópico de los batidos (Figura 4.6) evidenció que la distribución de celdas de aire se vio fuertemente afectada por el tipo de harina utilizada. Las imágenes muestran las burbujas más grandes en el primer plano y las más pequeñas en el segundo. Se observa que a medida que

disminuyó el tamaño de las partículas de harina, también disminuyó el tamaño de las burbujas ($r=0,90$, $p<0,01$). PWS-HI y PWS-80 presentaron una distribución de burbujas de aire pequeñas y homogéneas, siendo más evidente en la primera. También, estas muestras mostraron un mayor número de burbujas en comparación con WWS-IM y PWS-IM (Tabla 4.4). Las mismas tendencias se observaron en batidos de harina de sorgo marrón. En un estudio previo, de la Hera et al. (2013) también encontraron una distribución más pequeña y homogénea de las burbujas en los batidos a medida que utilizaban harinas de arroz con menores tamaños de partículas para la elaboración de bizcochuelos.

En la Tabla 4.4 se muestran las características de los batidos obtenidos. La densidad aumentó progresivamente con la reducción del tamaño de las partículas. Cuanto menor fue el tamaño de las partículas de harina, mayor fue la densidad del batido. Esto sugiere una menor proporción de aire incorporado pero capaz de formar burbujas de menor tamaño. Estas observaciones fueron reforzadas al encontrar correlaciones significativas negativas entre el tamaño de burbujas de los batidos y su densidad ($r= -0,69$; $p<0,01$). Dhen et al. (2016) describieron un efecto similar en la densidad de batidos, que aumentó a medida que se usó harina de soja con un tamaño de partícula más pequeño, en sustitución de harina de trigo para la elaboración de bizcochuelos. En el mismo sentido, se observó que la fracción de área ocupada por aire (burbujas) para los batidos preparados con harinas de menor tamaño de partícula, fue significativamente menor ($p<0,05$) (Tabla 4.4).

El proceso de batido combina todos los ingredientes en una mezcla uniforme e incorpora una gran cantidad de aire, lo cual es importante para el incremento de volumen en el horno, el volumen final y la textura del bizcochuelo, ya que estas burbujas actúan como núcleos para la expansión del bizcochuelo. La densidad de la mezcla está asociada con la incorporación de aire durante la formación del batido y la estabilización y retención de las burbujas durante los procesos posteriores. Las espumas líquidas, como lo son estos tipos de batidos, son sistemas complejos que contienen una gran cantidad de interfases gas-líquido-sólido, que son sistemas termodinámicamente inestables debido a su amplia área interfacial gas-líquido. Las celdas de gas en los batidos se estabilizan mediante componentes tensioactivos, que se incorporan naturalmente con los ingredientes (proteínas y lípidos de huevo y harina) o se agregan como aditivos (emulsionantes) (Godefroidt et al., 2019). Las partículas sólidas pueden adsorberse en las superficies de las burbujas durante la mezcla y estabilizar la espuma.

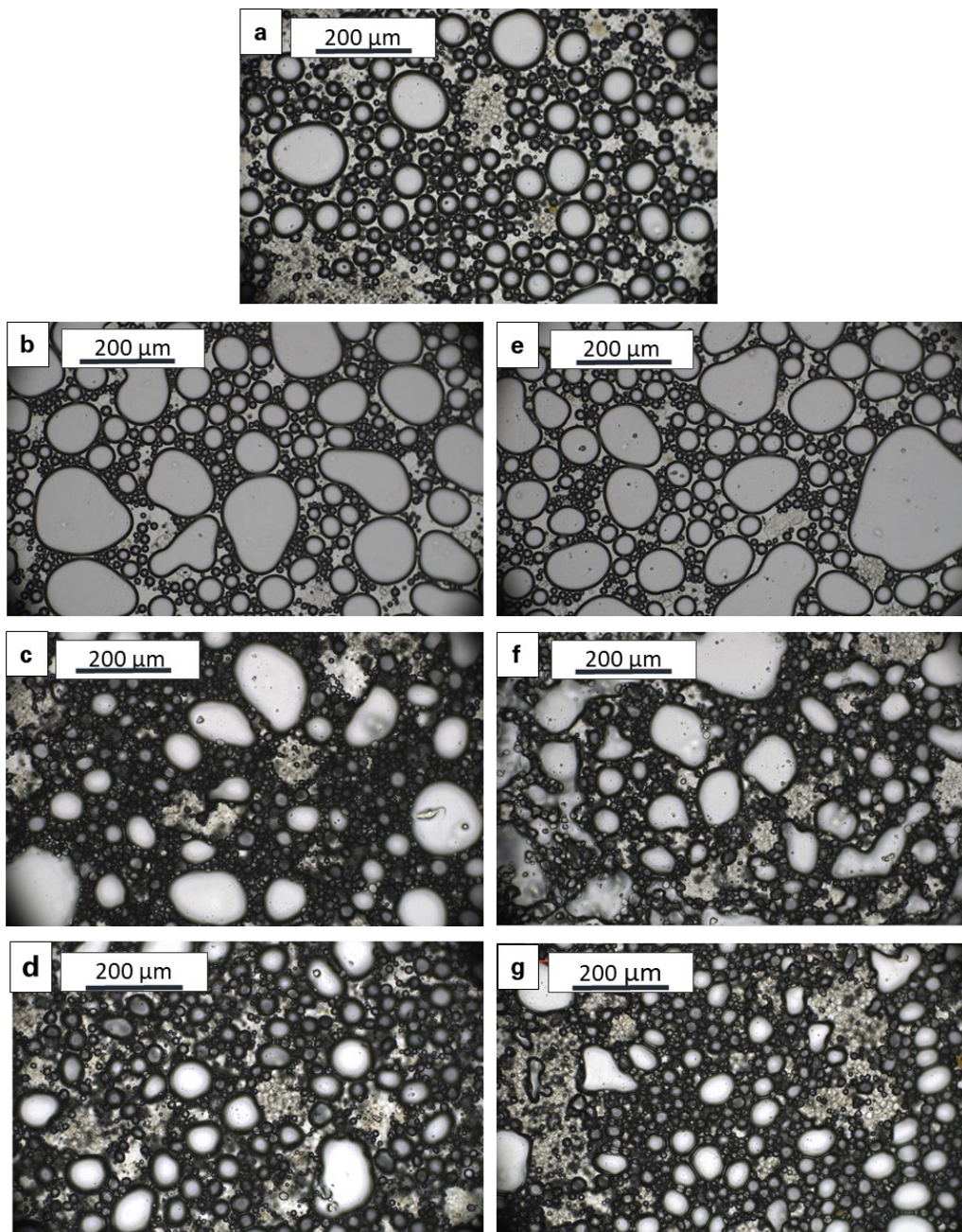


Figura 4.6. Microfotografías de batidos obtenidos con harina de sorgo blanco y marrón.

WWS-IM (a); PWS-IM (b); PWS-HI (c); PWS-80 (d); PSG (e); PSG-HI (f); PSG-80 (g).
WWS-IM: harina de sorgo blanco integral; PWS: harina de sorgo blanco pulido; PSG: harina de sorgo Gen 417 pulido;
IM: molienda por impacto; HI: muestras molidas con molino ciclónico; 80: muestras tamizadas de 80 µm.

La inestabilidad inherente de la espuma surge de la alta energía libre de la interfase gas-líquido. Esto constituye la fuerza impulsora termodinámica para reducir el área interfacial total a través de los procesos combinados de coalescencia y desproporción de burbujas (maduración de Ostwald).

En las espumas, las burbujas suelen ser más grandes y menos densas que las gotas de aceite en las emulsiones, por lo que la sedimentación (cremado) por gravedad es mucho más rápida que para las emulsiones aceite/agua. Aún más importante, sin embargo, es el hecho de que la solubilidad del gas en la fase acuosa de una espuma conduce a un transporte constante de masa por difusión entre burbujas de diferentes tamaños. A menos que las burbujas estén incrustadas en una matriz sólida, o rodeadas por una capa rígida similar a la capa adsorbida, el proceso de desproporción conduce inevitablemente a la pérdida de todas las burbujas del sistema excepto las más grandes (Dickinson, 2010). El efecto estabilizador de las partículas sobre la espuma se ve afectado por su hidrofobicidad, propiedades eléctricas, tamaño y concentración. Los principales mecanismos de estabilización son la adsorción de partículas en la interfase aire-agua, la estratificación de no adsorbentes y los cambios en la presión capilar provocados por la presencia de pequeñas partículas adsorbidas (Hunter et al., 2008).

Dos efectos principales se pueden relacionar con una distribución homogénea de burbujas más pequeña en batidos con partículas de harina más finas. En primer lugar, se espera una mejor distribución y dispersión de las proteínas y lípidos de la harina, lo que puede mejorar sus propiedades tensioactivas. En segundo lugar, el pequeño tamaño de partícula puede facilitar la adsorción de sólidos provenientes de harina hidratada sobre la superficie de la burbuja y de esa manera estabilizarla (Godefroidt et al., 2019).

Al igual que la densidad, la viscosidad de los batidos también aumentó progresivamente a medida que disminuyó el tamaño de las partículas. PSG-80 y PWS-80 exhibieron los valores más altos de viscosidad y también los contenidos más altos de carbohidratos y almidón dañado, lo que produjo los valores más altos de WRC (Tabla 4.1), debido a su papel espesante en la masa. La fuerte interacción entre estos componentes de la harina y las moléculas de agua disminuyó su movilidad y su capacidad lubricante y, en consecuencia, elevó la viscosidad del sistema. La correlación de Person confirmó estos resultados ya que DS exhibió una fuerte correlación positiva con WRC ($r=0,93$; $p<0,001$).

Tabla 4.4. Características de los batidos obtenidos con harinas de sorgo.

Muestra	Densidad del batido (g/cm ³)			Viscosidad Final (cP)			Nº total de burbujas			Área promedio de burbuja (µm ²)			Fracción de área (%)		
WWS	0,27	± 0,04	a	1246,00	± 22,00	a	475,00	± 11,00	a	167,93	± 18,28	b	19,83	± 2,61	ab
PWS-IM	0,28	± 0,00	a	1610,00	± 37,00	bc	462,50	± 2,50	a	274,35	± 3,19	c	31,59	± 0,21	de
PWS-HI	0,34	± 0,00	b	1938,50	± 23,50	c	1179,00	± 89,00	c	81,08	± 3,38	a	26,54	± 3,10	cd
PWS-80	0,47	± 0,01	c	2633,50	± 47,50	d	579,00	± 79,00	a	86,08	± 2,65	a	13,72	± 1,46	a
PSG-IM	0,27	± 0,01	a	1588,50	± 181,50	b	451,50	± 3,50	a	277,04	± 22,47	c	34,66	± 2,54	e
PSG-HI	0,36	± 0,00	b	1780,00	± 174,00	bc	1070,00	± 8,00	c	90,02	± 2,09	a	26,70	± 0,86	cd
PSG-80	0,46	± 0,00	c	3908,50	± 67,50	e	762,50	± 51,50	b	115,96	± 7,76	a	24,30	± 0,02	bc

Los valores se expresan como la media. Letras diferentes en la misma columna expresan diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido, PSG: harina de sorgo Gen 417 pulido; IM: molienda por impacto; HI: muestras molidas con molino ciclónico, 80: muestras tamizadas de 80 µm.

Los volúmenes de los bizcochuelos se vieron fuertemente afectados por el tamaño de partícula de la harina y se observó una relación directa entre el tamaño y la distribución de las burbujas en los batidos. Los bizcochuelos elaborados con harinas de menor tamaño de partícula (PWS-80 y PSG-80) mostraron los batidos con burbujas de menor tamaño y distribución de tamaño homogénea, las viscosidades más altas, la temperatura más baja de comienzo de la gelatinización y la viscosidad más alta durante el calentamiento. Al mismo tiempo, los bizcochuelos elaborados con estas harinas alcanzaron los mayores volúmenes. Los volúmenes de los bizcochuelos mostraron correlaciones positivas y significativas con la viscosidad ($r=0,81$; $p<0,001$), la densidad ($r=0,71$; $p<0,001$), el PV ($r=0,72$; $p<0,001$) y la FV ($r=0,77$; $p<0,001$) de los batidos.

De manera similar, Ronda et al. (2005) relacionaron las menores viscosidades de batidos con la pérdida de estabilidad de la espuma y la consiguiente reducción del volumen de los bizcochuelos. Nuestros resultados concuerdan con los reportados por de la Hera et al (2013) con harina de arroz; y por Choi y Baik (2013) y Moiraghi et al. (2013) con harina de trigo.

Las propiedades de textura de los bizcochuelos se muestran en la Tabla 4.5. La firmeza de los bizcochuelos elaborados con harina de mayores tamaños de partículas fue significativamente más alta que la de los obtenidos con fracciones más finas. Como era de esperarse, los productos elaborados con las harinas con menor tamaño de partículas (PWS-80 y PSG-80) fueron los más blandas y con mayor masticabilidad (Figura 4.7 c y f). En general, los bizcochuelos elaborados con harina de sorgo blanco y marrón de menor tamaño de partícula presentaron los menores valores de cohesividad y mayor elasticidad, lo que se relacionó con productos de mayor volumen (Figura 4.7 d y g).

Los valores de volumen de los bizcochuelos presentaron una correlación negativa significativa con la firmeza y ($r=-0,81$; $p<0,001$), la masticabilidad ($r=-0,79$; $p<0,001$), y una correlación positiva significativa con la elasticidad ($r=0,55$; $p<0,05$). El aumento de la temperatura durante la fase inicial de horneado conduce a una disminución de la viscosidad de la masa y al crecimiento de burbujas de gas debido a la expansión del aire, la formación de dióxido de carbono (CO_2) por parte de los agentes leudantes (si están presentes), la producción de vapor y la reducción de solubilidad del gas en la fase acuosa. Como consecuencia de estos eventos, el volumen aumenta. En la fase de horneado tardío, el hinchamiento y la desnaturalización del almidón y la coagulación de las

proteínas producen el establecimiento de la estructura del bizcochuelo (Godefroidt et al., 2019; Wilderjans et al., 2013).

Tabla 4.5. Características de los bizcochuelos obtenidos con harinas de sorgo.

Muestras	VE (cm ³ /g)	Firmeza (N)	Cohesividad (N)	Elasticidad (N)	Masticabilidad (N)
WW-IM-IM	2,46±0,00 ^a	11,2±1,8 ^{cd}	0,57±0,02 ^{bc}	0,86±0,01 ^a	5,6±1,1 ^{bc}
PWS-IM	2,74±0,24 ^{ab}	9,4±0,1 ^{bc}	0,62±0,01 ^{cd}	0,89±0,01 ^{ab}	5,1±0,1 ^{bc}
PWS-HI	2,49±0,03 ^a	14,6±1,6 ^d	0,55±0,01 ^b	0,91±0,00 ^{bc}	7,3±0,9 ^c
PWS-80	3,21±0,01 ^c	7,0±0,3 ^{ab}	0,55±0,01 ^b	0,91±0,00 ^{bc}	3,5±0,1 ^{ab}
PSG-IM	3,06±0,10 ^{bc}	7,9±1,1 ^{abc}	0,64±0,01 ^d	0,87±0,02 ^{ab}	4,3±0,6 ^{ab}
PSG-HI	3,06±0,08 ^{bc}	9,3±0,8 ^{bc}	0,50±0,06 ^a	0,93±0,01 ^c	4,3±0,1 ^{ab}
PSG-80	3,71±0,10 ^d	5,3±0,3 ^a	0,57±0,00 ^b	0,94±0,00 ^c	2,9±0,0 ^{ab}

Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 2). Letras diferentes en la misma columna para sorgos expresan diferencias significativas (p<0,05). WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido, PSG: harina de sorgo Gen 417 pulido; IM: molienda por impacto; HI: muestras molidas con molino ciclónico, 80: muestras tamizadas de 80 µm; VE: Volumen específico del bizcochuelo

Las Figura 4.7 a, b y e muestran que los bizcochuelos realizados con harina de tamaño de partículas medio mayores de ~210 µm tuvieron un colapso en el área central (WWS-IM, PWS-IM y PSG-IM), que generalmente es el resultado de una rápida pérdida de aire durante el horneado, con el consecuente colapso de la estructura interna (Sciarini et al., 2010). Estas muestras también generaron batidos con burbujas más grandes, valores más bajos de viscosidad y densidad (Tabla 4.4), el mayor retraso del comienzo de la gelatinización (SB) y la viscosidad más baja durante el calentamiento (PV) (Tabla 4.3). Además, el retraso en el inicio del pico de gelatinización (causado por la gelatinización del almidón) y la baja viscosidad alcanzada durante el calentamiento (como fue encontrado en los análisis de RVA) con un tamaño de partícula más grande, sugirió que el aumento de la viscosidad se produjo más tarde con estas harinas. En consecuencia, el sistema constituido no fue capaz de soportar su peso, lo que condujo a la formación de una depresión en el área central del bizcochuelo.

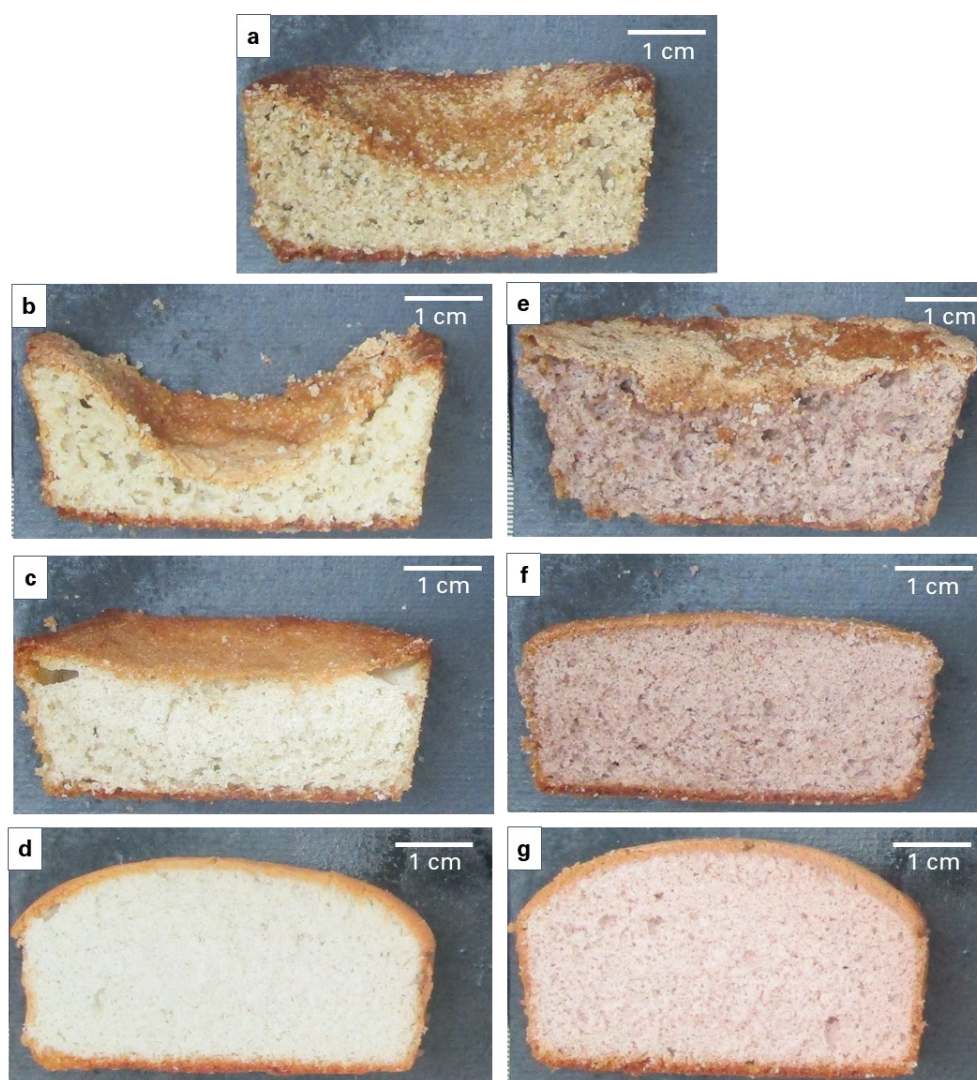


Figura 4.7. Fotografías de bizcochuelos elaborados con harina de sorgo blanco y marrón.

WWS-IM (a); PWS-IM (b); PWS-HI (c); PWS-80; (d); PSG-IM (e); PSG-HI (f); PSG-80 (g). WWS-IM: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido, PSG: harina de sorgo Gen 417 pulido; IM: molienda por impacto; HI: muestras molidas con molino ciclónico, 80: muestras tamizadas de 80 μm .

4.3.5 Análisis sensorial

A fin de obtener una aproximación de la aceptabilidad de los bizcochuelos se realizó una prueba sensorial descriptiva con la participación de 5 jueces entrenados. Los participantes del grupo focal percibieron un aroma dulce y agradable en todas las muestras y diferencias de color entre ellas. Los bizcochuelos elaborados con harinas de sorgo marrón presentaron una miga más oscura

que los elaborados con harinas de sorgo blanco, lo que se relacionó con el color marrón - amarillento inicial de estas harinas. El panel también notó que los bizcochuelos hechos con las harinas de tamaño de partícula más pequeño tenían cortezas y migas más ligeras que los productos obtenidos con harinas de mayor granulometría, particularmente las muestras PSG-80 y PWS-80. Esto se relacionó con la tamización de las muestras que redujo la fracción de salvado en las harinas, especialmente en sorgos marrones (Awika, Rooney, et al., 2005).

Al evaluar la percepción en boca, los bizcochuelos elaborados con WWS-IM, PWS-IM y PSG-IM, presentan una textura arenosa, probablemente relacionada con una integración incompleta de las partículas más grandes de las harinas durante el batido (Dhen et al., 2016). En general, los bizcochuelos elaborados con harinas de menor tamaño de partícula fueron descritos como de textura más esponjosa y suave. PSG-80 y PWS-80 fueron las harinas con las que se obtuvieron los bizcochuelos más suaves, lo que estuvo de acuerdo con las pruebas de textura previamente realizadas instrumentalmente. El bizcochuelo elaborado con harina obtenida por molienda ciclónica (PWS-HI) fue identificado como el más denso y seco, entre las muestras blancas. Todas las muestras fueron descritas como extremadamente dulces. Los bizcochuelos formulados con las harinas de menor tamaño de partícula (PSG-80 y PWS-80) fueron indicados como menos dulces. Finalmente, se describió una sensación de astringencia para todos los bizcochuelos de sorgo marrón, mientras que en los productos de harina de sorgo blanco fue apenas percibida y mínima para el elaborado con la harina más fina (PWS-80).

4.4 CONCLUSIONES

Los resultados indicaron que los procesos de molienda afectaron fuertemente las características de la harina de sorgo, en especial, el tamaño de partícula. Las fracciones de harina de sorgo más finas produjeron batidos con una distribución de tamaño de burbujas más pequeñas y uniformes, y valores más altos de viscosidad y densidad. Los perfiles de viscosidad, obtenidos en los sistemas agua-harina fueron mayores a medida que disminuyó el tamaño de las partículas de harina. Los batidos realizados con harina de sorgo marrón mostraron viscosidades considerablemente más altas que los preparados con harinas de sorgo blanco, sometidas a procesos de molienda similares. Las harinas que presentaron los tamaños de partícula más pequeños y los perfiles de viscosidad más altos fueron las más adecuadas para obtener bizcochuelos con mayor volumen y menor firmeza. En este sentido, las harinas con un 90% de la población de partículas por debajo de 211,5 μm de diámetro produjeron bizcochuelos sin colapso en la miga. El análisis sensorial mostró una mayor aceptación general de los bizcochuelos elaborados con harinas de menor tamaño de partícula, especialmente harinas de sorgo blanco.

En resumen, los resultados obtenidos en este capítulo permiten afirmar que la utilización de harinas de sorgo blanco con menor tamaño de partículas resulta en bizcochuelos con buenas características tecnológicas y sensoriales. Sin embargo, la utilización de harina de sorgo marrón requeriría modificar los parámetros de pulido y molienda empleados, para así obtener harinas con menor contenido de polifenoles y por lo tanto con menos astringencia, otra alternativa sería modificar la formulación de los bizcochuelos para mejorar la valoración sensorial.

5

CAPÍTULO 5: EFECTO DE HARINAS DE SORGO EN LA CALIDAD DE GALLETITAS LIBRE DE GLUTEN

5.1 INTRODUCCIÓN

Las galletitas son productos horneados que se caracterizan por un bajo contenido final de agua. Ocupan un lugar importante en los *snacks* industriales debido a su variedad de sabores, texturas y digestibilidad. Además, ofrecen un valioso vehículo de suplementación con nutrientes debido a su popularidad y aceptación, costo relativamente bajo, sabor variado, disponibilidad y larga vida útil (Collar, 2018).

Las galletitas comerciales pueden ser dulces o saladas y de esta manera surge una amplia variedad de productos que se denominan de acuerdo con los ingredientes y los procesos de producción. Estas se pueden clasificar en galletitas crackers y agua, obleas, semidulces y dulces. Los tres ingredientes principales son típicamente harina, azúcar y grasa; otros ingredientes que se pueden incluir en su formulación son agentes químicos leudantes, levaduras, jarabes, sal y emulsionantes, aunque estos generalmente solo se usan en baja concentración (Pareyt y Delcour, 2008).

Las galletitas dulces pueden ser producidas a través de masas antiaglutinantes, las que se distinguen por falta de elasticidad y extensibilidad debido a que la grasa y azúcar permiten la plasticidad y cohesión de la masa sin la formación de la red de gluten. Las galletitas dulces abarcan la gama más amplia de recetas, y su producción y venta superan por mucho a todos los demás tipos.

La calidad de este tipo de galletita puede ser resumida en dos términos generales. El primero es el tamaño de la galletita, tanto el diámetro o el ancho como la altura, siendo esperable una galletita delgada y de buen diámetro. El segundo es su textura o consistencia a la mordida. Las galletitas de buena calidad resultan tiernas a la mordida (Hoseney, 1994). Otros parámetros que suelen medirse para determinar la calidad de las galletitas es el color y la estructura superficial: es deseable que la galletita presente un patrón de agrietamiento uniforme.

La mayoría de los productos de panadería procesados y preenvasados, como panes, pasteles y galletas, son comúnmente producidos con harina de trigo. Aunque el gluten juega un papel importante en los procesos panaderos, en la mayoría de los tipos de galletitas dulces no se desarrolla una estructura red continua de gluten debido al alto contenido de grasa y azúcar en las recetas, y el escaso trabajo mecánico impartido en el proceso de mezclado (Mancebo et al., 2015; Pareyt y Delcour, 2008). Por lo tanto, es posible obtener galletas sin gluten con características muy similares a las elaboradas con harina de trigo (Mancebo et al., 2015; Rai et al., 2014).

Dentro de los componentes de la harina que se destacan en la elaboración de galletitas se encuentran el almidón, las proteínas y los arabinosilanos que se unen al agua y, por lo tanto, limitan la expansión de las galletitas (Pareyt y Delcour, 2008). Otro componente de las harinas que puede afectar la calidad de las galletitas es el contenido de almidón dañado, que corresponde a la fracción de gránulos de almidón que son afectados estructuralmente durante el proceso de obtención de harina. La fricción y el cizallamiento de los gránulos de almidón producido durante la molienda, promueven la erosión de las regiones exteriores y una deformación de las protuberancias nanométricas superficiales, así como la fragmentación granular y la liberación de dextrinas (Barrera et al., 2013). El almidón dañado afecta las propiedades de las harinas, principalmente su capacidad de hidratación, ya que absorbe agua en mucha mayor proporción que el almidón nativo, es decir, gránulos estructuralmente no dañados y a su vez se encuentra más disponible a la acción enzimática (Barrera et al. 2007). Numerosos investigadores estudiaron la relación agua-almidón en sistemas de masa de galletitas dulces de trigo y concluyeron que niveles más altos de almidón dañado conducen a diámetros finales de galleta más pequeños (Barrera et al., 2007; Hoseney y Rogers, 1994; Hoseney, 1994). Resultados similares fueron informados por Mancebo et al., (2015) para galletitas elaboradas con diferentes harinas libres de gluten (maíz, arroz, trigo sarraceno y teff). También, el tamaño de las partículas de harina es un factor importante que afecta la calidad de las galletitas (Belorio et al., 2019) y sus efectos varían según el tipo de masa (Manley, 2000).

La mayoría de los estudios sobre galletitas sin gluten han utilizado como sustitutos de la harina de trigo; trigo sarraceno (Dapčević Hadnadev et al., 2013; Gambuś et al., 2009; Molinari et al., 2018; Sakač et al., 2016), maíz (Paesani et al., 2020), amaranto (Chauhan et al., 2015; Inglett et al., 2015) y/o harina de arroz (Bassinello et al., 2011; Chung et al., 2014; Naseer et al., 2021). Otros estudios se han centrado en la combinación de harinas sin gluten (Inglett et al., 2015; Sakač et al., 2016), o una mezcla de harinas sin gluten y almidones (fécula de maíz, fécula de patata) (Giuberti et al., 2017; Schober et al., 2003).

Respecto a la harina de sorgo, esta se ha utilizado en la elaboración de galletitas como componente principal (Chiremba et al., 2009; Dayakar Rao et al., 2016; Garzón et al., 2020), en combinación con mezclas de harinas multocereales y legumbres (Vasanthakumari y Jaganmohan, 2018), y con otras harinas libres de gluten (Da Silva Fonte Boa et al., 2021; Rai et al., 2014). Chiremba et al. (2009) elaboraron galletitas partir de sorgo blanco sin taninos condensados e híbridos pigmentados, con y sin taninos condensados, con diferentes tasas de extracción. Si bien las galletitas formuladas con harinas con taninos condensados superaron entre 2 y 10 veces (según el nivel de extracción de la harina) la capacidad antioxidante de aquellas elaboradas con harinas de sorgos sin taninos, su aceptabilidad fue significativamente menor. Dayakar Rao et al. (2016) obtuvieron galletitas de sorgo a partir de harinas de diferentes granulometrías obtenidas con molino de piedras y de martillos. Las galletitas elaboradas con harina obtenidas mediante el primer sistema de molienda tuvieron mejor aceptación general. Por otra parte, Rai et al. (2014) obtuvieron galletitas a partir de la combinación de harina de sorgo con harina de maíz, arroz y mijo. La combinación con arroz obtuvo la mayor viscosidad durante el proceso de calentamiento, mientras que estos parámetros disminuyeron en todas las otras combinaciones. Sin embargo, esto no condujo a galletitas con un buen diámetro en comparación con las otras mezclas y con controles de trigo. Todas las combinaciones de harinas (sorgo, mijo, maíz) aumentaron los perfiles de viscosidad y mejoraron las propiedades funcionales, las cualidades sensoriales y los valores nutricionales de las galletas, mientras que la mezcla con harina de arroz solo lo hizo de manera marginal. También, Fonte et al. (2021), elaboraron galletitas a partir de las combinaciones harina de sorgo integral/harina de mijo germinado y harina de sorgo integral/harina de chía, con una relación 50/50 de cada una. Ambas formulaciones tuvieron buena aceptación sensorial y calidad nutricional.

En este capítulo se elaboraron galletitas utilizando harinas de sorgo (blanco y marrón) integral y pulido, obtenidas mediante molino de impacto. Además, se incorporó en la formulación harina

de arroz a fin de mejorar las características tecnológicas y sensoriales de las galletitas. Estas fueron sometidas a una prueba de análisis sensorial descriptiva a fin de analizar su aceptación por parte de los potenciales consumidores.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1 Materiales

Para la elaboración de galletitas se utilizaron dos híbridos comerciales de granos de sorgo: un sorgo marrón (Gen 417) y uno blanco, ambos multipropósitos. La descripción de los granos utilizados se encuentra en el Capítulo 2, apartado 2.2.1. Además, se utilizó harina de arroz comercial (Hacendado, Arrocerías Pons S.A., Valencia, España) para las mezclas 50/50 con harina de sorgo.

5.2.2 Obtención de harinas para la elaboración de galletitas

Para la elaboración de galletitas se utilizaron harinas de sorgo blanco y sorgo marrón obtenidas mediante abrasión previa de los granos y posterior molienda de impacto, según los procesos descritos en el Capítulo 2, apartados 2.2.3 y 2.2.4. Se seleccionaron las harinas de sorgo blanco y marrón, consideradas más adecuadas según sus características fisicoquímicas y tecnológicas. Se elaboraron galletitas con harinas de sorgo puras y se incorporó harina de arroz para obtener muestras con mezclas 50/50 (harina de sorgo/harina de arroz). Las harinas utilizadas fueron:

- Harina integral de sorgo blanco (**WWS-IM**) obtenida por molienda por impacto.
- Harina de sorgo blanco y marrón (Sorgo Gen 417), ambas obtenidas por pulido (180 s) y molienda por impacto (**PWS-IM** y **PGS-IM**).
- Harina de sorgo blanco integral, molido por impacto (50%) y harina de arroz (50%) (**WWS-RF**).
- Harina de sorgo blanco pulido, molido por impacto (50%) y harina de arroz (50%) (**PWS-RF**).
- Harina de sorgo marrón pulido, molido por impacto (50%) y harina de arroz (50%) (**PSG-RF**).
- Harina comercial de arroz (**RF**).

5.2.3 Composición proximal, propiedades de hidratación y contenido de polifenoles

La composición proximal, el contenido de polifenoles totales, el contenido de almidón dañado y la capacidad de retención de agua de las harinas de sorgo y las mezclas, fueron determinadas de acuerdo con la metodología descrita previamente (Capítulo 2, apartado 2.2.7 y Capítulo 4, apartado 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 y 4.2.6).

5.2.4 Perfiles de viscosidad

Se utilizaron harinas de sorgo previamente caracterizadas en el Capítulo 4 y se realizó el mismo procedimiento para las mezclas con harina de arroz 50/50 según lo detallado en el Capítulo 2, apartado 2.2.10. Se utilizó un analizador de viscosidad rápida (RVA 4500, Perten Instruments, EUA). Se suspendieron 3,5 g de cada muestra (14% Humedad) en 25 g de agua destilada y se colocaron en recipientes de aluminio). Se utilizó el método general de *pasting* “standard Newport Scientific Method 1 (STD1)”. Las dispersiones se agitaron a 960 rpm durante 10 s, seguidos de una agitación constante a 160 rpm hasta el final del ensayo. Inicialmente la temperatura de la suspensión se mantuvo a 50°C durante 1 minuto, luego se incrementó a 95°C en 5 min y se mantuvo durante 2,5 min más. Finalmente, se enfrió a 50°C en 3 minutos y se mantuvo a esta temperatura durante 2 min más. Durante el ensayo de *pasting* se registró la viscosidad y la temperatura de la suspensión en función del tiempo y, a partir de las curvas se obtuvieron los siguientes parámetros: la viscosidad máxima de pico (PV), la viscosidad media (VM), y la viscosidad final (VF). También se calcularon el “breakdown” (PV – VM) y el “setback” (VF – VM).

Además para conocer el comportamiento de las harinas y las mezclas en presencia de azúcar, se llevaron a cabo ensayos utilizando una solución de sacarosa al 50%, en lugar de agua como solvente (Kweon et al., 2009b). Los parámetros de *pasting* determinados en solución de sacarosa al 50% fueron la viscosidad pico (PV), considerada como la viscosidad máxima que alcanza la mezcla durante el calentamiento, y la viscosidad final (FV) (Blanco Canalis et al., 2019). Los análisis se realizaron por duplicado.

5.2.5 Análisis de tamaño de partículas

La determinación de la distribución de tamaño de partículas de las harinas de sorgo y las mezclas de harina de sorgo y arroz 50/50 se realizó según se describió en el Capítulo 2, apartado 2.2.9.

5.2.6 Formulación y preparación de las galletitas

Para la elaboración de las galletitas se realizó el proceso descrito por Sahagún y Gómez (2018). Primero, la margarina se calentó en el microondas (1000 W) durante 1 min. Posteriormente se agregaron en el bol de una batidora Kitchen Aid 5KPM50 (Kitchen Aid, EUA) la margarina y el azúcar y se batieron a velocidad 4 durante 10 min (batidor plano), raspando las paredes para bajar la masa cada 60 s. Cuando la margarina y el azúcar estuvieron perfectamente cremadas, se añadió el agua y se mezcló a velocidad 4 durante 120 s de manera continua. Por último, se incorporaron la harina y la sal. Se añadió bicarbonato de sodio y se mezcló a velocidad 2 durante 120 s, raspando las paredes cada 30 s. Después de mezclar, la masa se mantuvo tapada a 24 ± 1 °C durante 30 min. La masa fue laminada (6,00 mm espesor) en piezas por una laminadora Salva L-500-J (Salva, España). La masa laminada se cortó (cortador circular 40 mm de diámetro) y las piezas de masa (24 unidades por lote) se llevaron a un horno eléctrico convectivo durante 14 min a 185 °C. Posteriormente, las galletas se enfriaron a temperatura ambiente durante 60 min y se almacenaron a 24 °C en bolsas de polietileno selladas. Todas las galletas se prepararon en lotes duplicados.

Tabla 5.1. Ingredientes utilizados en la formulación de galletitas.

Ingredientes (g)	WWS-IM	PWS-IM	PSG-IM	WWS-RF	PWS-RF	PSG-RF
Harina de sorgo	173	173	86,6	86,6	86,6	86,6
Harina de arroz	-	-	-	86,6	86,6	86,6
Azúcar	125	125	125	125	125	125
Margarina	77,6	77,6	77,6	77,6	77,6	77,6
Bicarbonato de sodio	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Agua potable*	25,3	26,9	24,61	21,1	21,87	20,73

*Relacionado al contenido inicial de agua de cada harina. RF: Harina de arroz; WWS: Sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG: sorgo Gen 417 pulido, IM: molienda de impacto

5.2.7 Estudios reológicos de las masas

Las propiedades viscoelásticas de las masas se evaluaron mediante reología dinámica. Para los ensayos, las masas recién obtenidas se extendieron hasta un espesor de 3 mm sobre una laminadora y luego se cortaron en forma redonda con un cortador de 60 mm de diámetro. El comportamiento reológico de la masa fresca para galletitas se evaluó utilizando un reómetro (Haake RheoStress 1, Thermo Fisher Scientific, Alemania).

Cada muestra de masa se colocó en una geometría de placas de titanio dentadas en paralelo PP60 Ti de 60 mm de diámetro y 3 mm de separación y se cubrió con vaselina Panreac (Panreac Química S.A., España) para evitar su deshidratación durante la prueba. Se bajó el cabezal y se eliminaron los bordes sobrantes de masa con un elemento cortante plástico. Las muestras se dejaron descansar durante 5 min para relajar las tensiones producidas en la compresión, antes de iniciar el ciclo de deformación. La temperatura del sistema durante los ensayos se mantuvo a 25 °C con un baño de agua (Phoenix II P1-C25P, Inglaterra).

Inicialmente se sometió a la masa a un barrido de deformación (rango de tensión de 0,1 a 100 Pa) a temperatura (25 °C) y frecuencia (1 Hz) constantes. A partir de estos resultados, se seleccionó un valor de esfuerzo dentro de la región viscoelástica lineal y se realizaron los ensayos de barrido de frecuencia para obtener los valores del módulo de almacenamiento (módulo elástico, G'), módulo de pérdida (módulo viscoso, G''), módulo complejo (G^*) y tangente del del ángulo de desfasaje ($\tan \delta$) en un rango de valores de frecuencia (ω , Hz). Las medidas se realizaron por duplicado.

5.2.8 Caracterización de las galletitas

5.2.8.1 Textura

Los parámetros de textura de las galletitas se adquirieron usando un analizador de textura Texture TA-XT2 (Stable Micro Systems, Reino Unido). La fuerza máxima de quiebre o dureza de la galletita (en N) se obtuvo mediante una prueba de compresión de "flexión de tres puntos", realizada con una sonda de plataforma de flexión de tres puntos (HDP/3PB) (Figura 5.1). Las

condiciones de medición fueron: distancia de recorrido 20 mm, fuerza de disparo 5 g y velocidad de prueba 2,0 mm/s. Se evaluaron ocho galletitas por cada muestra (cuatro por lote).

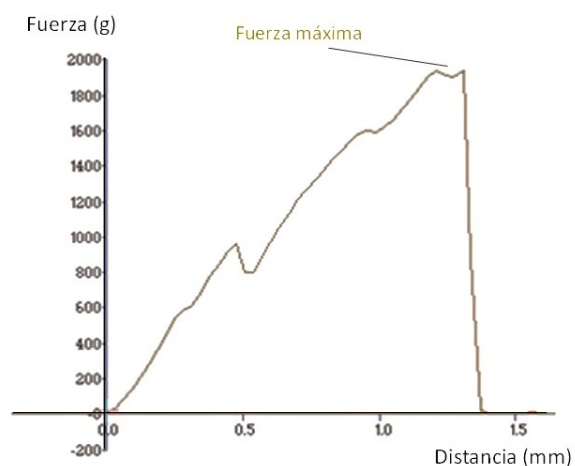


Figura 5.1. Gráfico típico resultante de una prueba de flexión de tres puntos.

5.2.8.2 Tamaño

Se midió el diámetro y espesor de las galletas en cuatro piezas de cada lote elaborado con un calibre digital de 0-150 mm, Blade, Data Output (Mitoyuyo, España). El diámetro de cada galleta se midió dos veces y de forma perpendicular, para obtener el diámetro medio. El factor de expansión de las galletitas se calculó como la relación entre el diámetro y el espesor promedio medidos.

5.2.8.3 Color

El color de las galletitas se midió en la superficie de cada una. Se midieron cinco puntos tomando cuatro cuartos imaginarios. Los colores de la superficie de cada galletita se midieron usando un espectrofotómetro (Minolta Co., Ltd, Japón) con el estándar D65 iluminado y el observador estándar de 2°. Los resultados se expresaron en el espacio de color CIE Lab (Caivano y Buera, 2012). Se evaluaron tres galletitas de cada preparación.

5.2.8.4 Análisis Sensorial

Se realizó una evaluación sensorial de tipo hedónica de las galletitas. Participaron 65 voluntarios entre 18 y 65 años que fueron seleccionados en base a ser consumidores habituales de galletitas.

Las muestras se evaluaron un día después de la cocción. Se entregó a cada juez agua para beber con el objetivo que realicen un enjuague bucal entre la evaluación de las distintas muestras. Cada juez recibió una galletita entera de cada muestra, presentadas en platos de plástico blancos codificados con números aleatorios de cuatro dígitos y servidos en orden aleatorio (Figura 5.2 b).

Las galletitas se evaluaron en función de la aceptabilidad a través de su aspecto visual, olor, textura, sabor y valoración global en una escala hedónica de nueve puntos. La escala de valores varió de "me gusta muchísimo" a "me disgusta muchísimo", correspondiente a las puntuaciones más alta y baja de "9" y "1", respectivamente (Figura 5.3). Todos los parámetros fueron evaluados con luz clara.



Figura 5.2. Fotografía de la cabina sensorial (a) y las muestras utilizadas (b).

CUESTIONARIO

Estamos realizando un estudio de consumidores sobre la mejora de la calidad nutricional de galletas, y para ello necesitamos tu colaboración. Por favor contesta a las siguientes preguntas, marcando con una cruz la opción elegida.

Sexo: Hombre Mujer

Edad: De 16 a 24 años De 25 a 34 años De 35 a 44 años
 De 45 a 54 años De 55 a 64 años Más de 65 años

FICHA DE CATA

A continuación, te presentamos diferentes muestras para que evalúes de una en una en orden aleatorio.

Puntúa cada uno de los parámetros solicitados del 1 al 9 en función de la siguiente escala

1 2 3 4 5 6 7 8 9
 Me disgusta Me disgusta Me disgusta Me disgusta Ni me gusta Me gusta Me gusta Me gusta Me gusta
 muchísimo mucho moderadamente ligeramente ni me disgusta ligeramente moderadamente mucho muchísimo

	7632	9451	4321	8749	2391
Aspecto visual					
Olor					
Textura					
Sabor					
Valoración Global					

Por favor, comenta en observaciones las características de cada una de las galletas que más te hayan llamado la atención

Observaciones:

MUCHAS GRACIAS POR SU COLABORACIÓN

Figura 5.3. Cuestionario modelo utilizado para la evaluación sensorial.

5.2.9 Análisis estadístico

Los datos se trataron estadísticamente mediante el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2015). Los resultados obtenidos fueron evaluados estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA). En el caso de presentar diferencias, la comparación de las medias se realizó mediante el test de Fisher (LSD) ($\alpha=0,05$). La relación entre los distintos parámetros fue determinada mediante el coeficiente de correlación de Pearson con $p \leq 0,05$. Todos los gráficos se obtuvieron utilizando el software Excel (Microsoft Office 365).

5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1 Propiedades de las harinas obtenidas

La elaboración de galletitas es generalmente menos dificultosa que otros productos horneados como los panes, ya que no necesitan una estructura capaz de retener los gases producidos durante la fermentación y el horneado, que es formada generalmente a partir del gluten de la harina de trigo (Chiremba et al., 2009; Taylor et al., 2006). Sin embargo, las galletas de sorgo tienden a ser más densas y tienen una textura más dura que sus contrapartes de trigo (Chiremba et al., 2009).

Para la elaboración de galletitas se utilizaron harinas de sorgo obtenidas por pulido y molienda, y sus mezclas con harina de arroz, a fin de obtener una masa más maleable que permita una mejor textura y sabor. En la Tabla 5.1 se presenta la composición proximal de las harinas de sorgo y sus mezclas con harina de arroz. El contenido de proteínas de las harinas de sorgo se situó entre 10,8% y 11,94%, mientras que para harina de arroz (RF) fue del 13,78%. Los lípidos se encontraron entre 1,75% y 4,57%, siendo el mayor valor correspondiente a harina de sorgo integral y el menor a harina de arroz. De la misma manera RF presentó el menor contenido de cenizas (0,48%) mientras que la harina de sorgo blanco integral el mayor (1,45%). Estos valores se encuentran de acuerdo con la composición reportada en estudios previos para estas harinas (León y Rosell, 2007).

En relación con el contenido de polifenoles totales, los mayores valores fueron obtenidos por harinas de sorgo marrón (PSG-IM) (211,06 mg/100g ácido gálico), y el menor por RF (73,67 mg/100 g ácido gálico), lo que se relacionó con el proceso de pulido del arroz blanco (Shao y Bao, 2015). Resultados similares fueron descritos por Rao et al. (2018) al analizar el contenido de polifenoles de sorgos blancos y marrones, siendo significativamente mayor en los últimos.

Tabla 5.2. Caracterización de harinas de sorgo y sus mezclas con harina de arroz.

Muestra	Humedad (%)	Proteínas (%)	Lípidos (%)	Cenizas (%)	ChT (%)	TPF (mg/100g)	WRC (%)	AD, (%)
WWS-IM	7,92 ^b	11,94 ^{bc}	4,57 ^e	1,45 ^e	74,12	57,86 ^c	2,51 ^b	8,90 ^b
PWS-IM	7,43 ^a	11,74 ^{bc}	3,32 ^d	0,64 ^c	76,88	27,29 ^b	2,51 ^b	10,21 ^c
WWS-RF	9,09 ^d	12,54 ^c	2,65 ^c	1,05 ^d	74,68	29,65 ^b	2,43 ^{ab}	9,72 ^c
PWS-RF	8,56 ^c	12,09 ^d	2,06 ^{ab}	0,56 ^b	76,74	22,99 ^b	2,36 ^a	9,92 ^c
PSG -IM	7,90 ^b	10,80 ^a	3,20 ^d	0,67 ^c	77,44	211,06 ^e	2,61 ^c	7,87 ^a
PSG-RF	9,30 ^e	11,36 ^{ab}	2,14 ^b	0,63 ^c	76,56	90,58 ^d	2,44 ^{ab}	9,00 ^b
RF	10,37 ^f	13,78 ^d	1,75 ^a	0,48 ^a	73,63	13,13 ^a	2,46 ^b	11,48 ^d

Los valores se expresan como medias (n=2). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG: sorgo Gen 417 pulido; RF: harina de arroz; IM: molienda de impacto; AD: almidón dañado; WRC: capacidad de retención de agua; ChT: carbohidratos totales; TPF: polifenoles totales (mg de equivalentes de ácido gálico).

La capacidad de retención de agua se relaciona con los compuestos hidrofílicos presentes en las harinas. En este caso, las muestras no presentaron diferencias significativas entre harinas de sorgo blanco sometidas a pulido previo a la molienda y la harina integral, pero sí con respecto a la harina de sorgo marrón, que obtuvo el mayor valor de WRC (2,61%). A su vez, WRC presentó una correlación significativa positiva con el contenido de polifenoles de las harinas ($r= 0,71$, $p<0,005$). Estudios previos han demostrado que las diferencias en la retención de agua en harinas de sorgo estuvieron relacionadas con el tamaño de partículas y el proceso de molienda, más que con la variedad de sorgo utilizada (Dayakar Rao et al., 2016). Sin embargo, en este caso PSG-IM presentó diferencias significativas en WRC respecto a las harinas de sorgo blanco (WWS-IM y PWS-IM), sometidas a la misma molienda y similar tamaño de partículas (Tabla 5.2).

En el presente estudio también se evaluó el contenido de almidón dañado de las muestras (AD %). Este es indicador del grado de compromiso mecánico sufrido por el granulo de almidón, que es fundamental para caracterizar a las harinas y relacionar su comportamiento en los procesos de elaboración de productos (Barrera et al., 2007). Las muestras de harina de arroz y sorgo blanco pulidos presentaron valores significativamente mayores de AD% (Tabla 5.2), como también sus mezclas. Como se mencionó anteriormente el mayor grado de refinamiento de estas harinas fue seguramente el responsable del aumento de este parámetro, debido a que las harinas fueron sometidas, además de a la molienda, a un proceso previo de abrasión. En general las muestras con mayor contenido de AD presentaron mayores valores de WRC, con excepción de PSG-IM. Esto permite sugerir que el contenido de almidón dañado y el tamaño de partículas de las harinas, no fueron los únicos parámetros determinantes en las propiedades de absorción de agua y que el contenido de polifenoles totales también representó una variable a considerar. Al analizar la composición de las mezclas se observó, como era esperable, un aporte equitativo de cada fracción debido a que las mezclas fueron 50/50, y provocaron el aumento o disminución proporcional de cada parámetro respecto al contenido original.

5.3.2 Tamaño de partículas de las harinas

El diámetro medio geométrico (D_{4,3}) y el D₉₀ de las partículas de las harinas variaron entre 141,73 y 591,46 μm , y entre 255,74 y 923,39 μm , respectivamente. Sin embargo, estos parámetros

fueron sustancialmente menores para la harina de arroz (Tabla 5.3). Esta marcada diferencia de tamaño respecto a las harinas de sorgo se relaciona con el proceso de molienda y las diferencias estructurales del cereal. Generalmente las harinas de arroz se obtienen por molienda de granos partidos de arroz totalmente pulidos (León y Rosell, 2007).

Tabla 5.3. Parámetros de distribución de tamaño de partículas.

Muestras	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	D4,3 (μm)	Span
WWS-IM	26,80 ^{ab}	553,01 ^{cd}	886,73 ^{bc}	524,52 ^{cd}	1,56 ^a
PWS-IM	43,71 ^c	616,46 ^d	923,11 ^c	591,46 ^d	1,43 ^a
WWF-RF	33,45 ^b	443,90 ^{bc}	923,39 ^{bc}	464,70 ^c	2,06 ^b
PWS-RF	34,24 ^b	413,59 ^b	885,03 ^c	442,80 ^{bc}	2,07 ^b
PSG-IM	22,66 ^a	531,89 ^{bcd}	834,32 ^{bc}	512,53 ^{cd}	1,53 ^a
PSG-RF	22,27 ^a	247,18 ^a	775,76 ^b	363,53 ^b	2,96 ^c
RF	30,16 ^{ab}	141,73 ^a	255,74 ^a	141,73 ^a	1,59 ^a

Los valores se expresan como medias (n=2). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG: sorgo Gen 417 pulido; RF: harina de arroz; IM: molienda de impacto; AD: almidón dañado D4,3: diámetro medio basado en volumen D10, D50, D90: diámetros donde el 10%, 50% y 90% de la población de partículas se encuentran por debajo de estos valores, respectivamente. Span: índice de polidispersidad.

Las poblaciones de partículas de las harinas de sorgo molidas por impacto (tanto pulidas e integrales) presentaron una distribución bimodal, con un pico correspondiente a partículas en un diámetro geométrico alrededor de los 20 μm y otro entre los 600 y 700 μm . En el caso de RF se observó un pequeño pico entre los 10 μm y 20 μm y uno de mayor tamaño a los 200 μm aproximadamente (Figura 5.4 a).

Las mezclas presentaron una distribución trimodal, explicada por la presencia de RF en proporción 50/50 en cada una de ellas. Se identificaron tres picos; uno aproximadamente los 20 μm , otro a los 200 μm y el tercero entre los 600 μm y 800 μm (Figura 5.4 b). Este último se caracterizó por ser más ancho, lo que es consecuente con el mayor valor de span de las mezclas respecto a las harinas puras.

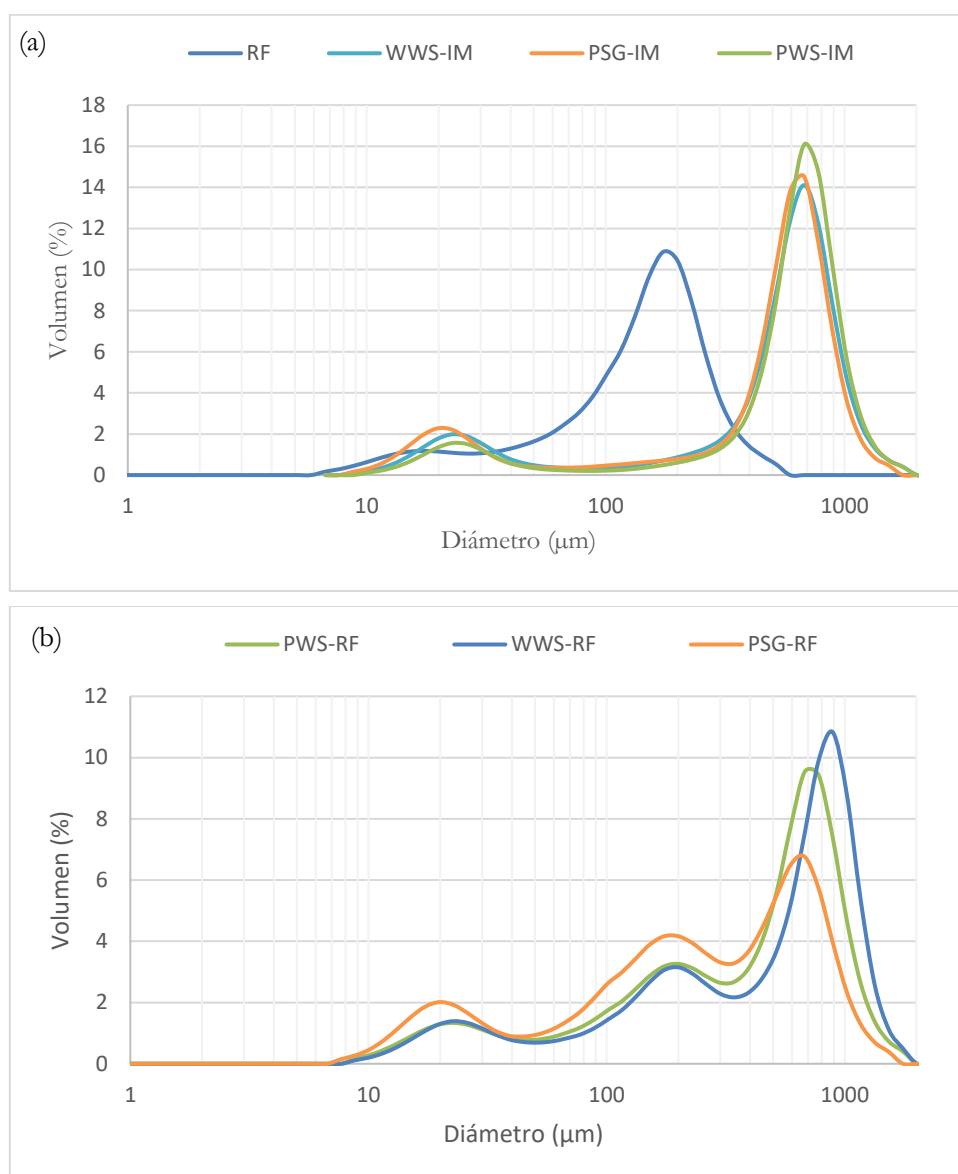


Figura 5.4. Distribución de tamaño de partículas de harinas de sorgo, arroz (a) y sus mezclas (b).
WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG: sorgo Gen 417 pulido; RF: harina de arroz; IM: molienda de impacto

5.3.3 Propiedades de pasting de las harinas

Los perfiles de viscosidad de las harinas mostraron el comportamiento normal del almidón en presencia de agua y calor. La combinación de tiempo, alta temperatura y cizallamiento, después del desarrollo inicial de la viscosidad máxima de la pasta caliente (entre 5,2 y 6 min en PV), produjo el proceso de ruptura parcial de los gránulos de almidón. La harina de arroz (RF) presentó valores de

PV y FV significativamente superiores a los obtenidos por las harinas de sorgo (Tabla 5.4). De manera similar BD y SB también evidenciaron diferencias significativas, lo que permite inferir que los gránulos de almidón de RF sufrieron una mayor hidratación e hinchamiento y posterior ruptura, y gelificación de la amilosa en la etapa de enfriamiento del sistema. Por el contrario, PT fue significativamente menor, lo que indica que el incremento de viscosidad por gelatinización ocurrió a menores temperaturas.

La incorporación de RF modificó el perfil de viscosidad de las harinas de sorgo al generar un aumento en las mezclas (Tabla 5.4). Se muestran en la Figura 5.4 a, los perfiles de viscosidad de las harinas de sorgo puras y su modificación al incorporar RF (Figura 5.5 b). De manera similar Fonte et al. (2021) describieron un aumento de la viscosidad de pico en de mezclas de harina de sorgo y harina de arroz, respecto a la harina de sorgo pura en la elaboración de galletitas.

Tabla 5.4. Parámetros de viscosidad de las harinas obtenidos en agua y solución agua/sacarosa.

Muestras	RVA - Agua					RVA - Sacarosa	
	PV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)	PV-S (cP)	FV-S (cP)
WWS-IM	988,50 ^a	31,50 ^a	1947,50 ^a	1054,50 ^a	88,50 ^e	91,00 ^a	139,00 ^a
PWS-IM	1314,50 ^b	39,50 ^a	2403,50 ^b	1128,50 ^a	86,38 ^d	140,00 ^a	255,00 ^b
WWS-RF	2351,50 ^d	289,50 ^b	5141,50 ^f	3064,00 ^d	86,45 ^d	247,00 ^b	293,00 ^b
PWS-RF	2548,50 ^e	353,00 ^b	4495,00 ^d	2339,00 ^c	83,60 ^c	409,50 ^c	535,50 ^c
PSG-IM	1849,00 ^c	381,50 ^c	2727,00 ^c	1321,00 ^b	78,70 ^b	2591,00 ^d	3139,00 ^d
PSG-RF	2847,50 ^f	553,00 ^c	4725,00 ^e	2378,00 ^c	79,40 ^b	1152,00 ^e	1412,50 ^e
RF	4613,00 ^g	1626,00 ^d	6843,00 ^g	3851,00 ^e	77,15 ^a	1365,00 ^f	1550,51 ^f

Los valores se expresan como medias (n=2). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0,05$). WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG-IM: sorgo Gen 417 pulido; RF: harina de arroz, PV: viscosidad pico; BD: breakdown; FV: viscosidad final; SB: se back; PT: temperatura de pasting; S: sacarosa.

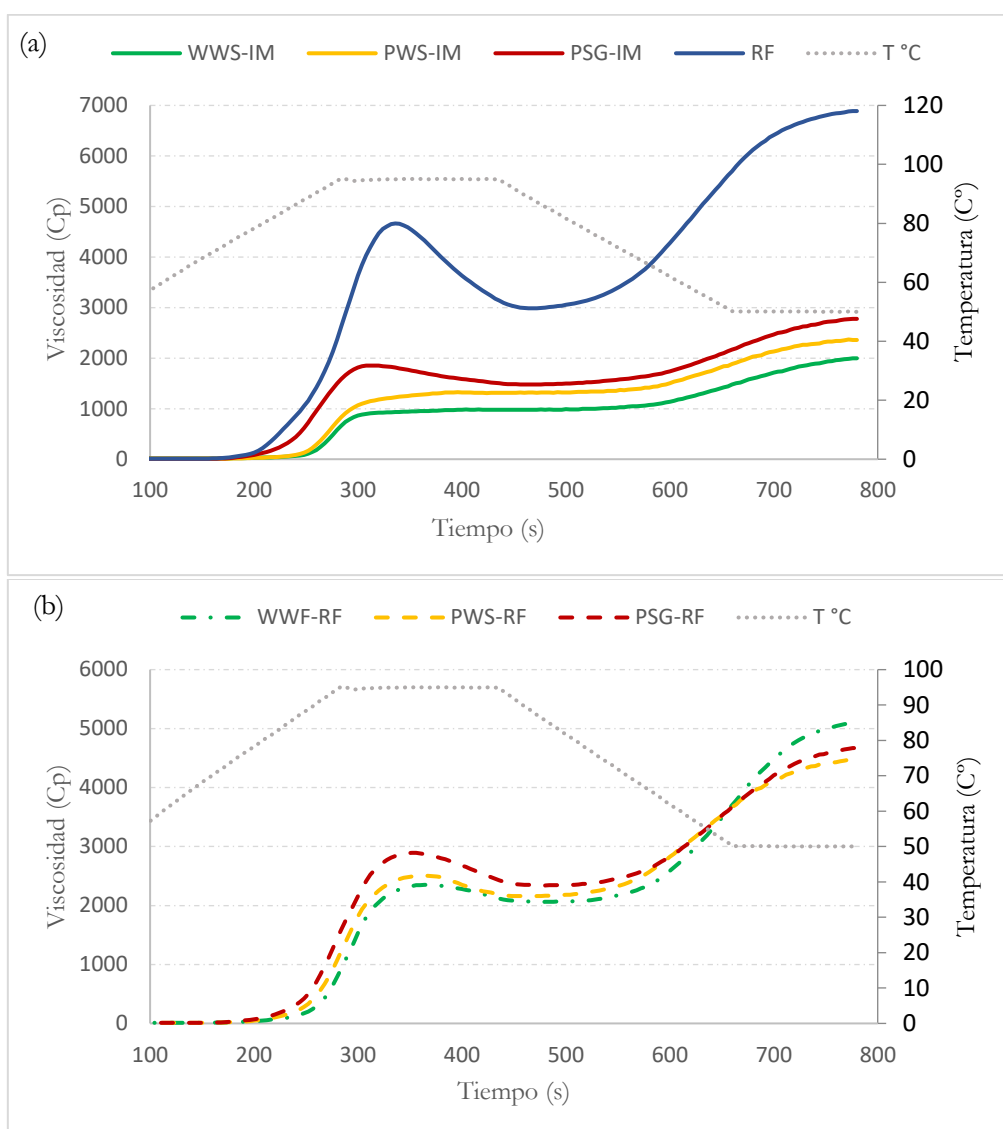


Figura 5.5. Perfiles de viscosidad de harinas de sorgo (a) y sus mezclas con harina de arroz (b) suspendidas en agua destilada.

WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG-IM: sorgo Gen 417 pulido; RF: harina de arroz; IM: molienda de impacto.

Si bien el perfil de viscosidad de las harinas es comúnmente estudiado en suspensiones de agua, no siempre representa fielmente el sistema que se produce en la elaboración de productos. En el caso de las galletitas realizadas, el azúcar es el segundo ingrediente en proporción utilizado después de la harina. Su presencia limita la disponibilidad de agua para hidratar otras partículas, ya que actúa como un polímero anti-plastificante (en comparación con el agua sola) cuando está en alta

concentración. Por esta razón, el uso de una solución de sacarosa como solvente en las pruebas de RVA permite una mejor aproximación al comportamiento real del sistema (Kweon et al., 2009b).

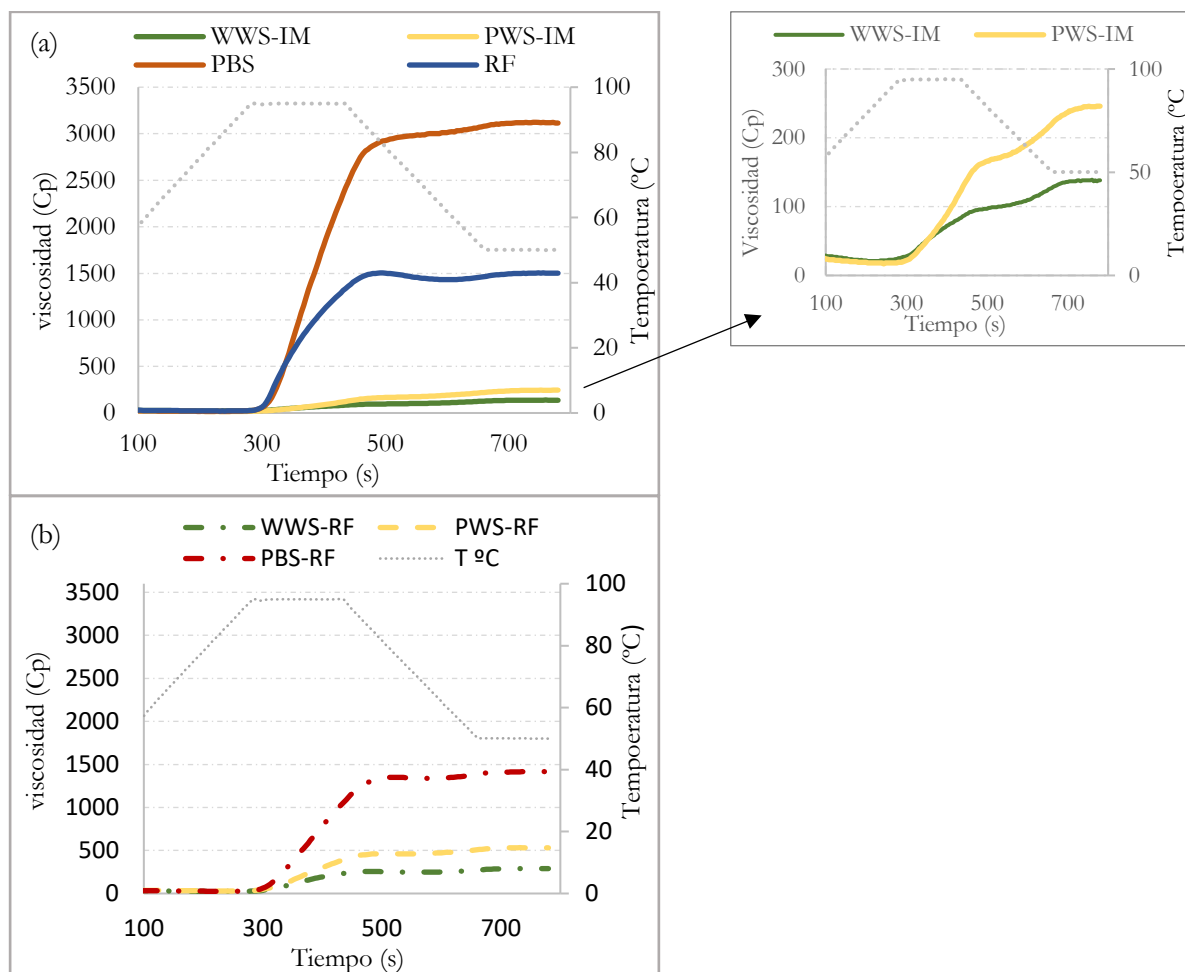


Figura 5.6. Figura. Propiedades de pasting de harinas de sorgo y arroz puras (a) suspendidas en solución de sacarosa al 50% y sus respectivas mezcla sorgo/arroz (b).

WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido (molido por impacto), PSG-IM: harina de sorgo marrón pulido (molido por impacto). La ampliación del recuadro muestra los perfiles de *pasting* de WWS-IM y PWS-IM.

A diferencia del comportamiento tradicional descrito en el sistema anterior, los perfiles de viscosidad de las muestras en solución de sacarosa al 50% mostraron un aumento continuo de la viscosidad durante el calentamiento, el tiempo de mantenimiento a la temperatura máxima y la primera etapa del enfriamiento, y un retraso de la viscosidad máxima de la pasta caliente, debido a la posterior gelatinización del almidón. Los perfiles de viscosidad correspondientes a las harinas de

sorgo blanco fueron significativamente menores a los de harina de sorgo marrón obtenidas por el mismo procedimiento de molienda y con una distribución de tamaño de partículas similares (Figura 4.6 a). RF también mostró un perfil de viscosidad menor que las harinas de sorgo marrón. Al analizar las mezclas, se observó que la combinación de RF con PSG-IM disminuyó su perfil de viscosidad (PSG-RF) mientras que las de sorgo blanco lo aumentaron (PWS-RF), respecto a los de las harinas puras. Esto es consecuente con el aporte de RF a las respectivas combinaciones (Figura 4.6 b). Se informaron resultados similares en trabajos anteriores (Kweon et al., 2010; Teobaldi et al., 2021), los cuales sugirieron que una alta concentración de azúcar retrasa la gelatinización y el proceso de *pasting* del almidón, debido a la acción antiplastificante de la solución de azúcar en comparación con el efecto plastificante del agua sola.

El proceso de *pasting* en solución de sacarosa al 50% no mostró la disminución de la viscosidad asociado a la fragmentación normal de los gránulos. Kweon et al. (2009b) encontraron resultados similares al estudiar el comportamiento de la harina de trigo y lo relacionaron al retraso en el desarrollo de la viscosidad y al tiempo insuficiente para que el proceso de desintegración ocurra, antes del enfriamiento y la gelificación. Kim y Walker (1992) estudiaron el efecto de las soluciones de sacarosa al 20, 30 y 50% sobre las propiedades de *pasting* del almidón de trigo. Descubrieron que se observaba un pico de la curva de formación de pasta de almidón de trigo por debajo de la solución de sacarosa al 20%, pero no aparecía ninguno por encima de la solución de sacarosa al 30%; y propusieron que este comportamiento pudiera explicarse por una menor desintegración de los gránulos, y la menor cantidad de almidón soluble lixiviado de los gránulos durante el calentamiento.

5.3.4 Reología de las masas

La reología de la masa es una característica fundamental en la elaboración de galletitas. Esta debe ser lo suficientemente cohesiva para permanecer unida durante las diferentes fases de procesamiento, a su vez permitir ser cortada fácilmente por el molde sin adherirse y sin deformarse. El comportamiento macroscópico de una masa depende de su microestructura, la cual está determinada por su composición, las disposiciones espaciales de los componentes y las diferentes

interacciones existentes entre ellos. En conjunto conforman las características propias de esa estructura que tienen influencia directa sobre las propiedades reológicas (Steffe y Freeman, 1994).

Las galletitas dulces contienen grandes proporciones de azúcar y grasa en su formulación y requieren muy bajos niveles de agua. Durante la preparación de la masa sólo se disuelve una fracción de la sacarosa (debido a las condiciones de hidratación del sistema), se dispersan los sólidos de la formulación, y todo el conjunto se emulsiona con la grasa. Como resultado de las limitadas proporciones de agua, las proteínas y el almidón se hidratan parcialmente durante el desarrollo de la masa, restringiendo la gelatinización de los gránulos de almidón durante la cocción y la posibilidad de formación de la red de gluten (en el caso de utilizar harinas con gluten). Por lo tanto, la masa de galletitas se constituye como una matriz no continua formada por proteínas, grandes glóbulos de grasa y gránulos de almidón, distribuidos homogéneamente. En consecuencia, este tipo de sistema carece de elasticidad y extensibilidad, y el comportamiento viscoelástico plástico, propio de estas masas, está especialmente condicionado por las elevadas proporciones de azúcar y grasa. La grasa actúa principalmente como lubricante y contribuye a la plasticidad de la masa, disminuyendo su viscosidad y promoviendo la reducción de su naturaleza elástica. El azúcar también favorece la reducción de la viscosidad y la pérdida de la consistencia de las masas (Maache-Rezzoug et al., 1998).

En este trabajo se obtuvo información de las características reológicas de las masas realizadas con harina de sorgo y sus mezclas con arroz mediante la aplicación de un esfuerzo oscilatorio y de amplitud constante, y se midió como respuesta la deformación generada, como deformación de corte (Belorio et al., 2019). Un material viscoelástico presenta paralelamente características de un líquido viscoso y de un sólido elástico. Para valorar el comportamiento de este tipo de material se necesita estudiar ambos módulos: elástico y viscoso. El comportamiento elástico está representado por la ley de Hooke y el comportamiento viscoso mediante la ley de Newton.

Las formulaciones con RF (control) no permitieron lograr una masa lo suficientemente laminable para este ensayo, a diferencia de las realizadas con harina de sorgo puro y sus mezclas. Esto pudo deberse a la diferente granulometría y propiedades de hidratación de la harina de arroz respecto a la de sorgo. Resultados similares fueron descritos por Belorio et al. (2019) al formular galletitas a partir de harinas de maíz con diferentes granulometrías, indicando que el tamaño de partículas presentes en la muestra influyó fuertemente el contenido de agua necesario para

formar la masa. En el caso de las mezclas sorgo/arroz las masas fueron plausibles de laminado y corte, pero con dificultad debido a su baja cohesividad.

Tabla 5.5. Parámetros reológicos de masas para galletitas

Muestras	G' (x 10 ⁶) [Pa]		G'' (x10 ⁵) [Pa]		Tan δ	
WWS-IM	2,68	a	1,76	a	0,07	a
PWS-IM	1,12	a	1,75	a	0,25	b
WWS-RF	1,40	a	1,29	a	0,09	ab
PWS-RF	1,12	a	1,75	a	0,25	b
PSG-IM	2,88	a	1,17	a	0,04	a
PSG-RF	1,59	a	1,26	a	0,08	ab

Los valores se expresan como medias (n=2). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (p<0,05). WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG: sorgo Gen 417 pulido; RF: harina de arroz; IM: molienda de impacto.

Los valores de G' fueron mayores que G''. Esto significa que la masa tuvo un comportamiento más de sólido viscoelástico, como un gel. La Tan δ es un parámetro que indica la relación existente entre los módulos viscoso y elástico (Tan δ= G''/G'). Los valores de Tan δ se encontraron debajo de 1, lo que confirma los resultados mencionados anteriormente y están de acuerdo con lo informado por otros autores (Belorio et al., 2019; Inglett et al., 2015; Paesani et al., 2020; Sahagún y Gómez, 2018) para galletitas libre de gluten. En el caso de masas con gluten para la formulación de galletitas también se espera un comportamiento de sólido viscoelástico (Belorio et al., 2021; Lee y Inglett, 2006). Estas características pueden proporcionar una mejor retención de la forma durante la manipulación y el horneado de la masa (Inglett et al., 2015).

No se encontraron diferencias significativas entre las muestras para G' y G'', lo que puede explicarse por la variabilidad en las mediciones debido a la dificultad de obtener masas lo suficientemente cohesivas (Belorio et al., 2019). Se observó una correlación positiva entre G' y WRC (r= 0,67; p= 0,02), lo que refuerza la explicación del comportamiento reológico en relación a las propiedades de hidratación de las harinas (Mancebo et al., 2017; Sahagún y Gómez, 2018), aunque estas no fueran significativamente diferentes entre las muestras.

Las masas elaboradas con PWS-IM y PWS-RF, obtuvieron los mayores valores de Tan δ. A su vez G' presentó una correlación significativa negativa con AD (r= -0,71; p= 0,01), lo que indicaría

que las harinas con mayor presencia AD condujeron a la obtención de masas menos elásticas, de hecho, RF presentó el mayor valor de AD y no permitió elaborar una masa capaz de ser laminada. De manera similar, PWS-IM que fue la muestra con el segundo mayor contenido de AD, condujo a la obtención de una masa que no permitió elaborar un producto con las características de una galletita, como se observará en la sección siguiente.

5.3.5 Características tecnológicas de las galletitas

El establecimiento de la estructura de una galletita ocurre fundamentalmente durante el horneado. A medida que la pieza de galletita se calienta en el horno se pueden observar tres eventos principales: una importante disminución de la densidad del producto, asociado al desarrollo de una estructura de poro abierto (responsable de la textura suave a la mordida, característica de las galletitas dulces), una reducción en el contenido de humedad, entre 1 y 4% y cambios en la coloración de la superficie. La falta de una estructura continua de proteínas, junto con la insuficiente gelatinización de almidón, y la reducción de la viscosidad a medida que se calienta la masa, hacen que esta no pueda mantener la forma y tienda a fluir o expandirse en altura y hacia los costados en el horno. Durante todo este proceso, cuando la temperatura en la masa supera los 60 °C, una fracción del almidón puede gelatinizar parcialmente debido a las limitadas condiciones de humedad. Posteriormente, cuando la temperatura supera los 90 °C debido al continuo calentamiento, las proteínas coagulan y se produce la deshidratación del sistema, lo que resulta en la estructura final de la pieza (Manley, 2000; Walker et al., 2012).

Es importante destacar que el diámetro final de la galletita se establece al finalizar el horneado y no es solamente el resultado de una continua expansión de la pieza de masa en el horno. La expansión de la galletita es un proceso complejo donde el diámetro final es función de la velocidad de expansión de la masa y del tiempo de fijación, que también depende de la viscosidad y estructura de la masa (Hoseney y Rogers, 1994).

Las características de las galletitas se muestran en la Tabla 5.6. Las galletitas elaboradas con harina PWS-IM obtuvieron el mayor diámetro, sin embargo, la estructura presentó orificios volviéndola extremadamente frágil. Se puede observar que sus características no correspondieron con lo que visualmente se identifica con una galletita (Figura 5.7). Si bien la masa se pudo laminar

y cortar, la textura arenosa y líquida percibida durante el proceso, indicó una dificultad en la hidratación e incorporación de las partículas de harina en la masa. Esta estructura no fue capaz de soportar el proceso de expansión en el horneado generando una matriz extremadamente fina y con orificios.

Tabla 5.6. Caracterización de las galletitas elaboradas con harina de sorgo

Muestras	Dimensiones				Textura			Color				
	Diámetro (mm)		Factor de expansión		Dureza (N)			L*	a*	b*		
WWS-IM	52,00	ab	8,27	ab	49,90	c	52,59	b	5,50	b	22,79	c
PWS-IM	72,61	d	23,03	d	13,67	a	48,77	c	8,35	c	23,49	c
WWF-RF	49,26	bc	6,93	a	47,55	de	62,74	c	3,60	a	22,69	c
PWS-RF	57,86	c	11,72	bc	38,52	cd	64,82	c	2,25	a	25,85	d
PSG-IM	61,72	c	12,93	c	22,76	ab	38,06	a	5,80	b	8,63	a
PSG-RF	55,06	ab	10,76	bc	33,42	bc	51,87	b	7,40	c	13,77	b

Los valores se expresan como medias (n=2). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG-IM: sorgo marrón pulido; RF: harina de arroz;

El factor de expansión se relaciona principalmente con dos factores: el aumento de volumen y diámetro de la pieza de masa durante el horneado, debido a la liberación de gases por parte de los leudantes químicos y a la disminución de la viscosidad provocada por la fusión de la grasa y la disolución del azúcar. El diámetro y la altura de las galletitas estarán controlados por la velocidad de expansión y por el tiempo en el que ocurra la fijación de la estructura (Miller y Hosoney, 1997). Este tiempo está determinado por la cantidad de agua que se encuentre libre en la masa para actuar como solvente y la fuerza de la masa (Ram y Singh, 2004), lo que permite afirmar que los componentes de la harina capaces de ligar agua son relevantes en el desarrollo de la galletita.

El factor de expansión y el diámetro de las galletitas correlacionaron positivamente ($r = 0,98$; $p < 0,0001$) y fueron mayores en las muestras obtenidas con harinas parcialmente refinadas (PWS-IM, PSG-IM). Las galletitas elaboradas con WWS-IM y WWS-RF presentaron un menor diámetro y factor de expansión. Estas diferencias se relacionaron con el contenido de salvado de las muestras. La presencia de una mayor cantidad de fibra en las muestras integrales provocó una reducción significativa en la extensión de la pieza, debido posiblemente a una mayor capacidad para absorber agua, lo que incrementó la viscosidad del sistema durante el horneado y limitó su expansión. Por lo tanto, es esperable que las galletitas con menor factor de expansión hayan sido elaboradas a partir de harinas con mayor capacidad de hidratación (Mancebo et al., 2017).

La textura de este tipo de galletitas generalmente es algo áspera y arenosa, y esto se debe a la coalescencia de las burbujas de gas formadas durante la cocción. La incompleta disolución de la sacarosa es un factor relevante para la textura de las galletitas, ya que la sacarosa cristalizada, procedente de la fracción no disuelta durante la formación de la masa, aporta a la textura crujiente del producto a temperatura ambiente. La superficie de este tipo de producto presenta en general un aspecto agrietado que está relacionado con los cambios fisicoquímicos ocurridos durante la cocción de la masa (Manley, 2000).

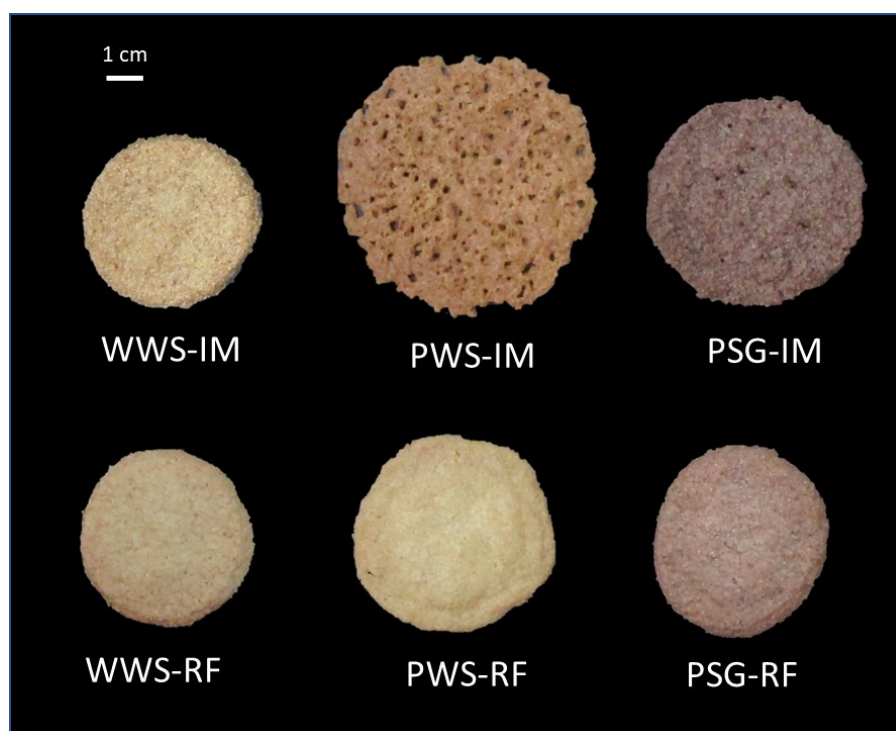


Figura 5.7. Imágenes de galletitas de harina de sorgo y sus mezclas harina de arroz.

WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG: sorgo marrón pulido; RF: harina de arroz.

Para evaluar la textura de las galletitas se utilizó un ensayo de flexión de tres puntos para determinar la fuerza máxima de quiebre o dureza de la galletita. Se observó una correlación negativa de la dureza de la galletita con el diámetro ($r = -0,92$; $p < 0,0001$) y el factor de expansión ($r = -0,90$; $p < 0,0001$). Las muestras presentaron diferencias significativas, PWS-IM fue la galletita más blanda lo que es consecuente con su mayor diámetro y frágil estructura. Las galletitas formuladas con WWS-IM y WWS-RF fueron las de mayor dureza. La presencia de mayor contenido de fibra en estas galletitas explicaría el fenómeno también observado por otros autores (Baumgartner et al., 2018; Mancebo et al., 2018). Estos atribuyeron el comportamiento a la compactación de las

partículas de la fibra insoluble dentro de la masa que, a diferencia de la fibra soluble, no se disuelve en agua y mantiene su forma original. Sin embargo, un efecto contrario fue informado por Duta y Culetu (2015), Paesani et al. (2020) y Wilderjans et al. (2008), que explicaron la obtención de galletitas más blandas con la incorporación de fibra debido al mayor contenido de lípidos de esta fracción (suele extraerse junto con el salvado) y a la formación de una estructura más heterogénea y menos compacta. El sorgo contiene principalmente fibra insoluble y un bajo contenido de lípidos, lo que explicaría la mayor dureza de las galletitas elaboradas con WWS-IM y WWS-RF.

Finalmente, se evaluó el color de las galletitas. Generalmente el color de la superficie de un producto horneado, que posee azúcar en su formulación, se encuentra relacionado principalmente con la ocurrencia de reacciones de Maillard y de caramelización durante el proceso de cocción (Ait Ameer et al., 2007). Sin embargo, también puede ser afectado por el color de las harinas utilizadas (Mancebo et al., 2015). Este es uno de los atributos que primero influencia al consumidor en la aceptación de las galletitas. En este estudio el color de las galletitas estuvo fuertemente afectado por el tipo de harina utilizada.

En la Tabla 5.6 se encuentran los parámetros L^* , a^* y b^* para cada muestra. Las galletitas elaboradas con PWS-IM y PWS-RF presentaron los mayores valores de L^* , siendo más claras las muestras obtenidas con PWS-IM. Se encontró una correlación significativa negativa entre el valor L^* de las galletitas y el contenido de TPF de las harinas ($r = -0,82$; $p = 0,012$). Esto era esperable debido a que el contenido de TPF en sorgos coloreados es significativamente mayor (de Morais Cardoso et al., 2017). Con respecto al parámetro b^* , también se observó una fuerte correlación con TPF ($r = -0,94$; $p < 0,0001$). Las galletitas elaboradas con harina de sorgo marrón (PSG-IM) y sus mezclas con arroz (PSG-RF) obtuvieron los mayores valores y presentaron colores más oscuros y rojizos como era esperado (Figura 5.7). La superficie de las galletitas no presentó un aspecto agrietado que es considerado deseable. Resultados similares fueron informados por Chiremba et al. (2009) para galletitas elaborados con harina de sorgo blanco y rojo.

La calidad galletitera se define principalmente por dos atributos. El primero es el tamaño de la galletita, siendo esperable una galletita delgada y de buen diámetro. El segundo es su textura o consistencia a la mordida; las galletitas de buena calidad resultan tiernas a la mordida. Otros parámetros que suelen determinarse para evaluar la calidad de las galletitas son el color y la estructura superficial: es deseable que la galletita presente un patrón de agrietamiento y color

uniforme (Hoseney, 1994). En este sentido las galletitas obtenidas con sorgo blanco (con excepción de PWS-IM) y sus mezclas con arroz fueron las que consiguieron características más adecuadas, mientras que las de sorgo marrón y sus mezclas con arroz presentaron un color oscuro que generalmente no se considera un atributo deseable.

5.3.6 Análisis Sensorial

Los aspectos sensoriales y la aceptación de los productos alimenticios juegan un papel relevante durante el desarrollo de un nuevo producto. Por ello la utilización de pruebas sensoriales permite obtener una aproximación real previa a su producción comercial.

Las galletitas sometidas a evaluación sensorial fueron aquellas elaboradas con las mezclas 50/50 harina de sorgo y arroz (WWS-RF, PWS-RF Y PSG-RF). No se incluyeron en el ensayo las galletitas elaboradas íntegramente con PSG-IM debido a su alta astringencia previamente testeada. Tampoco fueron sometidas a análisis sensorial las galletitas elaboradas solo con harina PWS-IM, debido a que el producto obtenido no obtuvo ninguna de las características asociadas a una galletita.

Por otra parte, se elaboraron galletitas solamente con harina de arroz como muestras control debido a que, la harina de arroz es una de las más utilizadas en la formulación de productos libre de gluten, y por lo tanto conocida por los consumidores. Estas se formularon con una proporción de agua mayor que para el resto de las muestras debido a que con la cantidad de agua original no fue posible obtener una masa laminable. Los resultados del análisis sensorial se muestran en la Tabla 5.7 y Figura 5.8.

Dentro de los atributos evaluados, se encontraron diferencias significativas en el sabor y la apariencia. La muestra control (RF) obtuvo la mayor puntuación respecto a la apariencia seguida por WWS-RF. El sabor percibido como más agradable se obtuvo en galletitas elaboradas con WWS-RF. El resto de las muestras no presentaron diferencias significativas para estos atributos. Con respecto al aroma, WWS-RF fue la mejor puntuada mientras que las demás muestras no presentaron diferencias significativas. La textura percibida no presentó diferencias significativas. Chiremba et al. (2009) al elaboraron galletitas con harinas de sorgo blancos y rojo (con y sin

taninos), y describieron una mejor valoración para las obtenidas con sorgo blanco, destacando su apariencia, textura y aroma.

Tabla 5.7. Análisis sensorial de galletitas elaboradas con harina de sorgo.

Muestras	Apariencia		Aroma		Textura		Sabor		Aceptación general	
WWS-RF	6,00	b	6,12	b	4,52	a	5,37	b	5,48	b
PWS-RF	5,52	ab	5,48	a	3,91	a	4,49	a	4,58	a
PSG-RF	5,20	a	5,45	a	3,91	a	5,03	ab	4,95	ab
RF	6,72	c	5,48	a	4,46	a	4,82	ab	5,25	b

Los valores se expresan como medias (n=2). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG-IM: sorgo Gen 417 pulido; RF: harina de arroz.

Finalmente se evaluó la aceptación general de las galletitas; las muestras elaboradas con WWF-RF y RF, recibieron las mejores puntuaciones, mientras para que las demás galletitas fueron menores y no significativamente diferentes entre ellas. A diferencia de lo observado en otros estudios (Baumgartner et al., 2018; Duta y Culetu, 2015) la incorporación de harina integral no fue en detrimento de las propiedades sensoriales, sino que produjo un efecto positivo mejorando su aceptabilidad respecto de las galletitas con menor contenido de salvado (PWS-RF y PSG-RF).

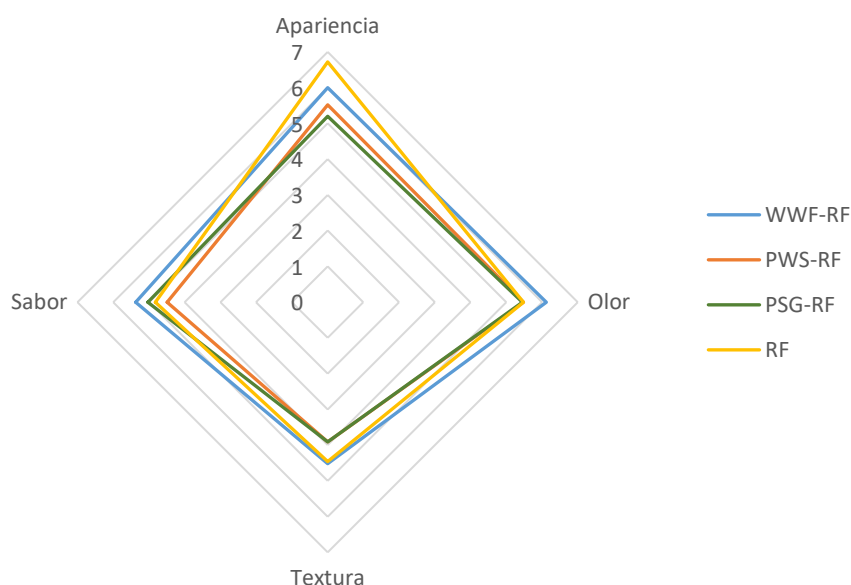


Figura 5.8. Perfil sensorial de galletitas elaboradas con harina de sorgo y arroz.

WWS: sorgo blanco integral; PWS: sorgo blanco pulido; PSG-IM: sorgo Gen 417 pulido; RF: harina de arroz.

En acuerdo con nuestros hallazgos, Rodríguez et al. (2009) informaron que galletitas preparadas con 58 y 67% de harina de sorgo blanco, 8 y 17% de harina de arroz y 33 y 17% de fécula de maíz respectivamente, tuvieron características sensoriales satisfactorias. También Rai et al. (2014) obtuvieron galletitas con harina de sorgo germinado con una aceptable calidad tecnológica y buena aceptabilidad sensorial, incluso mayor que el control de trigo utilizado. Sin embargo, la formulación de galletitas con la totalidad de harina de sorgo, sin el uso de pretratamientos (fermentación, germinación, etc.) ni combinación con otras harinas, ha sido menos estudiada y continúa siendo un desafío debido a las características tecnológicas y sensoriales del sorgo.

5.4 CONCLUSIONES

Las harinas de sorgo utilizadas para la elaboración de galletitas mostraron que sus perfiles de viscosidad en solución acuosa fueron similares para todas las muestras. La harina de arroz empleada para obtener mezclas con harina de sorgo presentó valores de viscosidad significativamente superiores, lo que produjo un aumento de los perfiles de todas las mezclas. Al evaluar el comportamiento de la viscosidad en solución de sacarosa/agua se observó un aumento significativo en el correspondiente a la harina de sorgo marrón con una distribución de tamaño de partículas similar al resto de las harinas de sorgo y superior al de harina de arroz. Las harinas con mayores perfiles de *pasting*, tanto en agua como en solución de sacarosa/agua, resultaron en galletitas de mayor diámetro y factor de expansión.

Por otra parte, según el comportamiento reológico de las masas realizadas con harina de sorgo y sus mezclas con arroz, estas fueron caracterizadas como sólidos viscoelásticos. Las masas presentaron propiedades reológicas similares, solo se diferenciaron en la relación existente entre los módulos viscoso y elástico ($\tan \delta = G''/G'$), que fue mayor para harina de sorgo blanco parcialmente refinada y su combinación con harina de arroz.

Las galletitas elaboradas con harinas de sorgo blanco y marrón parcialmente refinadas presentaron mayor diámetro que las obtenidas con harina integral. A su vez la incorporación de arroz disminuyó el diámetro de todas las galletitas y permitió conseguir con harina de sorgo blanco parcialmente refinada, un producto con características adecuadas. Finalmente, el ensayo de evaluación sensorial indicó que las galletitas obtenidas con la mezcla de harinas de arroz y sorgo blanco integral presentaron la mejor aceptabilidad y fueron comparables con las galletitas control elaboradas con harina de arroz.

6

CAPÍTULO 6: EFECTO DE HARINAS DE SORGO EN LA CALIDAD DE PANES LIBRES DE GLUTEN

6.1 INTRODUCCIÓN

El pan es un producto leudado, consumido por numerosas culturas y obtenido tradicionalmente por la fermentación de los azúcares provenientes de la harina de trigo, producto de la hidrólisis enzimática del almidón. El proceso de elaboración involucra procesos fisicoquímicos y bioquímicos que transforman la masa viscoelástica, en una miga elástica y una corteza crujiente. Existen diversos métodos de elaboración, aunque todos comparten las etapas de amasado, fermentación y cocción.

Durante el amasado las partículas de harina se hidratan lentamente, las proteínas del gluten interaccionan entre sí gracias al trabajo mecánico, y dan lugar a la formación de una red tridimensional con capacidad de retener los gases originados en la fermentación. Se produce también la integración del almidón a esta red, al igual que el resto de los componentes de la harina, mientras que la sal o los azúcares (ingredientes solubles), permanecen en solución. Simultáneamente, la masa incorpora aire en forma de diminutas burbujas que serán las responsables del alveolado final del pan. La activación de las amilasas durante el amasado produce azúcares fermentables (mono y disacáridos) debido a su acción sobre el almidón dañado que, junto con los azúcares presentes en la masa, constituirán el sustrato para la acción de las levaduras. Las levaduras transforman estos azúcares en alcohol, dióxido de carbono y otros compuestos menores que

influyen en el aroma final del pan. Una vez fermentadas las piezas son introducidas en el horno, donde incrementan su volumen, se forma la miga y la corteza. A los 60 °C aproximadamente se produce la gelatinización del almidón y comienza la inactivación de las levaduras. Los fenómenos de evaporación de agua hacen que la temperatura del interior de la masa no suba de 100 °C. Por último, el aumento de la temperatura posibilita las reacciones de Maillard entre azúcares y aminoácidos, y reacciones de caramelización con el consiguiente oscurecimiento de la corteza (León y Rosell, 2007).

La elaboración de panes sin TACC supone un gran desafío debido a la necesidad de reemplazar la funcionalidad de la red de gluten. Generalmente cuando se trabaja con harinas sin gluten al realizar la mezcla con agua se obtienen batidos con características viscoelásticas en lugar de masas, haciendo que la producción de pan sea compleja desde el punto de vista tecnológico (Mir et al., 2016). La mayoría de las masas libres de gluten tienden a contener niveles más altos de agua y tienen una estructura más fluida. El efecto plastificante del agua es crucial en la elaboración de panes sin gluten ya que contribuye a las propiedades de extensión de la masa durante el amasado/mezclado, lo que facilita una mayor hidratación de los gránulos de almidón durante el horneado (Marco y Rosell, 2008). Sin embargo, un exceso puede provocar una expansión excesiva de los panes con la presencia de grandes alveolos en la miga (Han et al., 2012). Además, debe considerarse la capacidad de retención de agua de la harina utilizada, ya que partículas grandes tienden a una menor capacidad de hidratación en comparación con las finas (de la Hera et al., 2013; de La Hera et al., 2014).

El proceso de elaboración de panes libres de gluten difiere significativamente del utilizado de manera estándar para panes de trigo. Tradicionalmente, la masa de trigo se mezcla, divide y moldea; se deja leudar y, finalmente, se hornea. Un método para producir pan libre gluten con buenas características consiste en mezclar, fermentar y hornear (Moore et al., 2004). De esta manera se reducen las etapas de elaboración principalmente porque se parte de una mezcla líquida, por lo que el proceso se asemeja a la elaboración de un bizcochuelo, con la diferencia del tiempo de fermentación previo al horneado. Este método se aplicó con éxito en estudios posteriores sobre pan sin gluten (Moore et al., 2006, 2007; Renzetti et al., 2008; Schober et al., 2005).

La falta de una estructura, como la que genera el gluten, que permita retener el aire incorporado durante el amasado/batido y el dióxido de carbono producido por la fermentación de la levadura, junto a la presencia de fuerzas repulsivas entre los gránulos de almidón, son en gran parte

responsables de la falta de estabilidad de los sistemas (Schober et al., 2005). Como resultado, los panes libres de gluten generalmente son más rígidos y su textura es más irregular y desmenuzable, debido a que poseen alveolos irregulares e inestables producidos por una menor capacidad de retención de gases (Onyango et al., 2011).

Para superar este desafío, las formulaciones de pan sin gluten involucran diversos enfoques para mejorar sus propiedades tecnológicas, sensoriales y vida útil. Entre ellas se destacan el uso de harina de diferentes cereales (arroz, maíz, sorgo) (Mancebo et al., 2015; Schober et al., 2005; Sciarini et al., 2020), pseudocereales (quinoa, amaranto, trigo sarraceno) (Machado Alencar et al., 2015; Mariotti et al., 2013), harinas de leguminosas (Aguilar et al., 2015; Shin et al., 2013), almidones de cereales y tubérculos (Mahmoud et al., 2013; Paesani et al., 2020), hidrocoloides (Lazaridou et al., 2007), emulsionantes y grasas industriales (Bize et al., 2017), o sus combinaciones (Gómez et al., 2007).

Dentro de los hidrocoloides más utilizados se encuentran la hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), goma xántica y guar, carboximetilcelulosa (CMC), entre otros. Este tipo de compuestos son conocidos por sus propiedades hidrofílicas, que se asocian con una mayor retención de agua y una mejora en las propiedades viscoelásticas de los batidos. Su capacidad de espesamiento (aumento de la viscosidad) ha llevado a su uso como estabilizadores de suspensiones y emulsiones, donde funcionan retardando la sedimentación de partículas, ya que restringen la movilidad de las gotas y las colisiones entre ellas y, por tanto, reducen el riesgo de coalescencia. Los hidrocoloides también pueden adsorberse sobre la superficie de partículas o gotitas e inhibir la agregación por fuerzas estéricas o electrostáticas. Cada hidrocoloide tiene características funcionales únicas, lo cual es consecuencia de su estructura química, tamaño y forma molecular (Williams y Phillips, 2003). Esto contribuye a una mayor retención de gases producidos durante la fermentación, evitando el colapso de la estructura y mejorando la textura de la miga (Velázquez et al., 2012).

La utilización de sorgo en la elaboración de panes libres de gluten ha sido analizada en combinación con otras harinas. Schober et al. (2005) emplearon harinas de sorgos blancos y rojos decorticados en una relación 70/30 (harina de sorgo/almidón de maíz) y obtuvieron resultados variables según la cantidad de agua y goma xántica añadidos. Velázquez et al. (2012) elaboraron panes con harina de sorgo y maíz en proporciones variables, y consiguieron productos con características tecnológicas aceptables con una relación 50/50 de las harinas. Por su parte Trappey

et al. (2015), utilizaron harina de sorgo blanco con distintos niveles de extracción (70%) y almidón de papa no modificado (30%) para la elaboración de panes libres de gluten, obteniendo mejores resultados a mayor grado de refinamiento de las harinas de sorgo. Sin embargo, en la elaboración de pan el uso de harinas de sorgo para reemplazar totalmente la harina de trigo ha sido limitado debido a las restricciones fermentativas y viscoelásticas de la masa, por la ausencia de proteínas del gluten (Collar, 2018).

La formulación de productos sin gluten sigue siendo un desafío también desde el punto de vista nutricional. Dado que los alimentos a base de trigo son una fuente importante de ingesta de energía, se ha demostrado que las personas que mantienen una dieta libre de gluten estricta suelen padecer deficiencias nutricionales, particularmente en el caso de los niños (Penagini et al., 2013). La malabsorción es un sello distintivo de la enfermedad celíaca que conduce a la deficiencia de calcio y otros minerales. Además, se ha demostrado que varios productos libres de gluten disponibles comercialmente tienen un contenido más bajo de folatos, hierro y vitaminas B o no están enriquecidos/fortificados en comparación con los obtenidos a base trigo (Thompson, 2000; Thompson et al., 2005). Si bien la inflamación producida en la mucosa es controlada mediante la eliminación total del gluten, lo que mejora la absorción de nutrientes, la incorporación de agentes antiinflamatorios se cree que no solo produce beneficios sobre la reacción local intestinal, sino también a nivel sistémico. En este sentido, el sorgo es rico en fitoquímicos, predominantemente compuestos polifenólicos que le confieren propiedades antiinflamatorias y antioxidantes (Awika y Rooney, 2004). Estos pueden proteger contra el estrés oxidativo, la exposición a los rayos UV y contaminantes que contribuyen a la iniciación y desarrollo de enfermedades crónicas como diabetes tipo 2, enfermedades del corazón y algunos cánceres (Pérez-Matute et al., 2009).

En este capítulo se elaboraron panes con tres harinas de sorgo blanco: integral y pulido, ambas obtenidas por molienda de impacto; y harina obtenida mediante molienda por rodillo con posterior tamización. Los panes elaborados fueron caracterizados y posteriormente sometidos a un ensayo de digestibilidad *in vitro* para evaluar sus propiedades antioxidantes y la biodisponibilidad de minerales.

6.2 MATERIALES Y MÉTODOS

6.2.1 Materiales

Para la elaboración de panes se utilizaron harinas de sorgo blanco obtenidas mediante pulido (PWS-IM), sin pulido previo y molienda de impacto (WWS-IM), y también por molienda de rodillos y posterior tamizado (WS-RM). Las harinas fueron acondicionadas a valores de humedad medios según los ensayos realizados previamente (11,67% -13,03%).

El acondicionamiento y la molienda se realizaron según los procedimientos descritos en el Capítulo 2, apartados 2.2.2, 2.2.4 y 2.2.5.

6.2.2 Caracterización de harinas

La composición proximal, la distribución de tamaño de partículas, el color y los perfiles de viscosidad de las harinas fueron realizados según lo descrito en el Capítulo 2 apartados 2.2.7, 2.2.8, 2.2.9 y 2.2.10, respectivamente.

6.2.3 Elaboración de panes

Los panes se elaboraron utilizando la siguiente formulación según el procedimiento descrito por Sciarini et al. (2020): 180 g de harina de sorgo; 20 g de harina de arroz, 10 g de harina de mandioca, 6 g levadura prensada comercial; 4 g de margarina comercial, 4 g cloruro de sodio; 2 g de carboximetilcelulosa (CMC), 1 g de estearoil lactilato de sodio (SSL), 0,2 g de leudante químico y 200 mL de agua.

Se mezclaron los ingredientes sólidos, y luego se incorporaron la margarina y la levadura dispersa en el agua. Se mezclaron en una batidora planetaria (Peabody SmartChef, Argentina) por 1 min a baja velocidad y 1,5 min a alta velocidad. La masa se colocó en un recipiente contenedor y se dejó reposar durante 30 min. Luego del leudado se volvió a batir por 30 s con una batidora

manual a velocidad mínima. Se vertieron 65 g de masa en moldes de aluminio y se sometió a una segunda fermentación por 60 min (30 °C y 85% humedad relativa). Finalmente, se llevaron a un horno convectivo por 30 min a 180 °C (Horno Beta 107 IPA - Pauna, Argentina).

6.2.4 Caracterización de los batidos: resistencia a la extrusión

El ensayo de resistencia a la extrusión se realizó con un analizador de textura INSTRON 3342 (EUA) según lo descrito por Sciarini et al. (2020) con algunas modificaciones. Este consiste en aplicar una fuerza de compresión mediante una sonda cilíndrica al material que se encuentra en un vaso contenedor (también cilíndrico, pero de mayor tamaño que la sonda) hasta que comience a fluir por el espacio remanente entre la superficie externa de la sonda y la pared interna del contenedor.

Las muestras de los batidos se prepararon según lo descrito para realizar el proceso de panificación, pero sin la incorporación de levadura y omitiendo los pasos de fermentación. Muestras de 40 g de batido se colocaron en recipientes cilíndricos de aluminio (diámetro: 36,5 mm). Las muestras fueron extruidas por la sonda cilíndrica (diámetro: 35 mm) a una velocidad de 1 mm/s hasta y una distancia de 25 mm, mientras se registró la fuerza de extrusión en función del tiempo. La fuerza de la extrusión se obtuvo como la fuerza requerida para extrudir la muestra hasta 15 mm de su altura (Figura 6.1). Los batidos fueron analizados por duplicado.

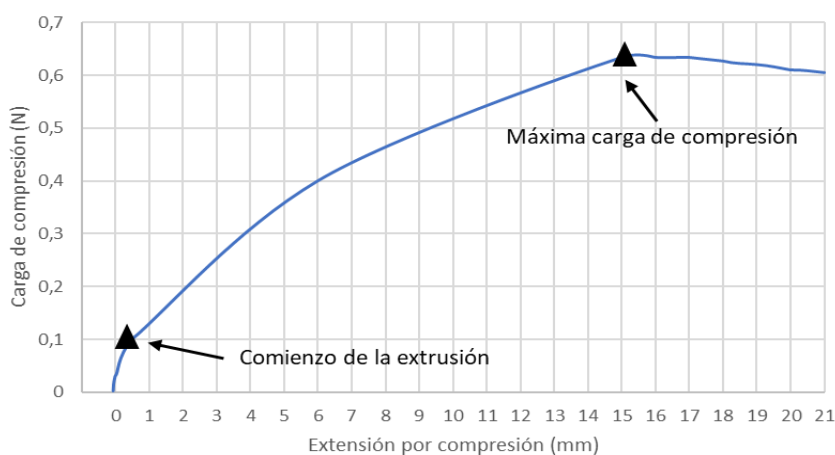


Figura 6.1. Curva representativa obtenida en un ensayo de compresión.

6.2.5 Evaluación de la calidad de los panes

6.2.5.1 Volumen específico del pan

El volumen del pan se determinó por desplazamiento de semillas de colza, 24 h después del horneado. El volumen específico (VE) se obtuvo dividiendo el volumen de la muestra por su peso (cm^3/g) (Método 10-05; AACC, 2010). Se realizaron 5 determinaciones de cada lote, se informó el valor promedio de los dos ensayos de panificación de cada muestra.

6.2.5.2 Color de la miga

Se siguió el procedimiento descrito en el Capítulo 5 apartado 5.2.8.3. En este caso, de cada ensayo de panificación se tomaron 3 panes, a los que se les efectuaron 5 mediciones de color en la miga informándose el valor promedio.

6.2.5.3 Textura

La firmeza (F) de la miga de pan se evaluó mediante un analizador universal de textura INSTRON 3342 (EUA) según lo realizado por Sciarini et al. (2012). Se obtuvieron dos rodajas de 1,5 cm de espesor del centro de cada pan y se sometieron a un test de compresión (en dos ciclos) bajo las siguientes condiciones: celda de compresión de 5 kg; velocidad del cabezal 100 mm/min; distancia 10 mm, y 100 g de carga, deformación máxima 40%; diámetro de la sonda cilíndrica de compresión 25 mm.

La dureza de la miga se expresó como la fuerza requerida para comprimir la muestra hasta el 25% de su espesor original. También se determinaron los parámetros de elasticidad (E) y cohesividad (C), y se obtuvieron por calculo la gomosidad, G ($G:F \times C$) y la masticabilidad, M ($M:G \times E$). Estos parámetros se describen en el Capítulo 4, apartado 4.2.12.2. Se realizaron al menos seis determinaciones por cada muestra.

6.2.5.4 Estructura de la miga

Para el análisis de la estructura de la miga se obtuvieron dos rodajas (1,5 cm de espesor) de la región central de cada pan y cada una fue escaneada con un escáner (HP Scanjet G3010, EUA). Las imágenes obtenidas se evaluaron con el programa de análisis de imágenes Image-J 1.48a (National Institutes of Health, EUA). Las imágenes de colores se convirtieron a imágenes de 8-bits y se analizaron en escala de grises (0 negro, 255 blanco). Las imágenes seleccionadas fueron segmentadas por un valor de gris para crear imágenes binarias mediante el algoritmo Iso-Data (Rasband, 2009). De este modo, todos los píxeles con nivel de gris por debajo del umbral se mostraron en negro y fueron considerados aire (alveolos) y los píxeles con nivel de gris por encima del umbral se mostraron en blanco y fueron considerados objetos (miga de pan) (Figura 6.2).

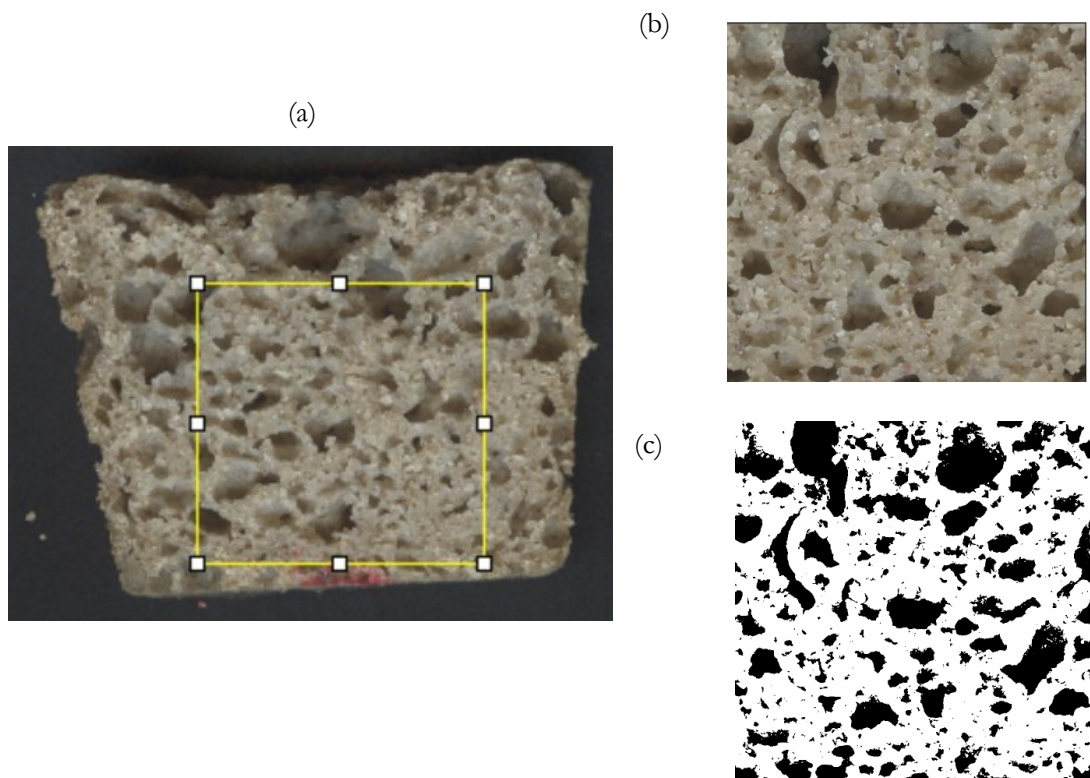


Figura 6.2. Fotografía de una rodaja de pan, mostrando el área seleccionada para el análisis de imagen (a). Esta selección es luego transformada en imagen de 8-bits (b) y posteriormente binarizada, obteniéndose la imagen mostrada en (c).

El análisis de las imágenes permitió obtener los siguientes parámetros:

- Número total de alveolos, N: cantidad de alveolos en la superficie seleccionada de la rodaja de pan (4x4 cm).
- Tamaño promedio de alveolos, TA: área promedio de los alveolos en mm².
- Fracción de área, FA: es el porcentaje del área total que corresponde al área ocupada por alveolos.
- Uniformidad, U: fue determinado como la relación entre el número de alveolos con una superficie menor a 4 mm² y el número de alveolos con una superficie mayor a 4 mm².

6.2.6 Evaluación del contenido de polifenoles y su capacidad antioxidante en harinas y panes de sorgo

6.2.6.1 Preparación de los extractos

Se seleccionaron dos muestras de panes: uno elaborado con harina de sorgo blanco integral obtenida por molienda de impacto (**WWS-IM**), y otro con harina de sorgo blanco producida por pulido y posterior molienda por impacto (**PWS-IM**). También se prepararon extractos con las respectivas harinas. Todos los extractos se obtuvieron según se describió en el Capítulo 4, apartado. 4.1.4.

6.2.6.2 Determinación de polifenoles totales

La obtención de los extractos de harinas y panes, y la cuantificación del contenido de polifenoles totales realizó según se describió en el Capítulo 4, apartado. 4.2.4.

6.2.6.3 Determinación de actividad antioxidante

La actividad antioxidante de extractos de panes y harinas fue medida por los métodos de ABTS [2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico)] (Re et al., 1999) y FRAP (Poder de reducción antioxidante del ion férrico) (Pulido et al., 2000). El ensayo de ABTS mide el poder anti radicalario de la muestra, mientras que la técnica de FRAP determina el poder reductor. La utilización de ambos métodos permite analizar las dos formas de acción de la actividad antioxidante.

En resumen, se mezclaron 100 μ L de los extractos debidamente diluidos con el reactivo correspondiente y se midió la absorbancia a 593 nm y 734 nm, respectivamente. En ambos casos, los resultados se obtuvieron a partir de una curva de calibración realizada con Trolox. En los dos métodos la curva de ajuste R^2 fue superior a 0,98. Los resultados se expresaron en mg de Trolox equivalente por 100 g de muestra en base seca. Todas las muestras se analizaron por triplicado. Se usaron blancos de reacción (que contenían solo reactivos) para cada tipo de muestra (extractos de harinas o panes), para descontar la absorbancia debida a los solventes y reactivos.

6.2.7 Identificación de compuestos polifenólicos por HPLC-DAD-ESI-MS/MS en harinas y panes de sorgo

El perfil fenólico se obtuvo por HPLC-DAD-ESI-MS/MS, utilizando un sistema LC Agilent Serie 1200 (Agilent, EUA), acoplado con un detector DAD (Agilent Serie 1200, EUA) junto con una fuente ESI, conectado a un MicroQTOF II (Bruker Daltonics, EUA) espectrómetro de masas (MS y MS/MS). El sistema de HPLC estaba equipado con una bomba de gradiente binario, un desgasificador de solventes y un muestreador automático (Agilent Series 1200 L, EUA).

Los análisis de HPLC se realizaron en una columna C18 (5 m, 250 mm x 4,60 mm de d.i.) LUNA (Phenomenex, EUA), a 35 °C y un caudal de 0,4 mL min^{-1} , usando ácido fórmico al 0,5% (disolvente A) y ácido fórmico al 0,5% en metanol (disolvente B). El programa de gradiente comenzó con 20% B y cambió a 50% B durante 3 min, se mantuvo durante 5 min, seguido de una segunda rampa a 70% B durante 7 min, se mantuvo durante 5 min y una tercera rampa a 80% B a

lo largo de 1 min, y permaneció en esta última condición durante 9 min antes de la siguiente corrida. El volumen de inyección de las muestras debidamente diluidas fue de 40 uL.

Los polifenoles se identificaron según sus tiempos de retención, masa exacta, espectros MS y MS/MS, y se compararon con estándares auténticos cuando estuvieron disponibles. Cuando no se disponía de estándares auténticos, la identificación tentativa se realizó mediante MS exacta y MS/MS, considerando informes de compuestos en la literatura (Kang et al., 2016; Ofosu et al., 2021; Pontieri et al., 2021; Rao et al., 2018).

6.2.8 Ensayo de digestibilidad *in vitro*

6.2.8.1 Materiales

Se seleccionaron dos muestras de panes de sorgo blanco previamente elaborados, según se describió en este Capítulo, apartado 6.2.3:

- **WWS-IM:** Pan elaborado con harina de sorgo blanco integral obtenida por molienda de impacto de los granos.
- **PWS-IM:** Pan elaborado con harina de sorgo blanco obtenida por pulido y molienda de impacto de los granos.

6.2.8.2 Digestión *in vitro*

Se simuló un modelo de digestión *in vitro* en cuatro etapas: digestión bucal, digestión estomacal (gástrica), digestión y absorción del intestino delgado y fermentación colónica tal como lo describen Lucini Mas et al. (2022)(Figura 6.3). Brevemente, se mezclaron dos gramos de panes con 2 mL de fluido salival (que contenía amilasa). Se realizó una simulación de la masticación durante 1 min rompiendo la muestra con un Ultra-Turrax T18 blender (Ika-Labortechnik, Germany) y se incubó durante 2 min a 37 °C con agitación orbital. Después de la digestión oral simulada, la muestra se ajustó a pH 2,0 con HCl 6 M y se incubó en un baño de agua con agitación durante 2 h a 37 °C

con 500 μL de pepsina de mucosa gástrica porcina en HCl 0,1 M (concentración final de 2000 U/mL), para simular la digestión gástrica. El siguiente paso fue imitar la digestión y absorción en el intestino delgado. Para ello, se mezcló una solución de pancreatina y sales biliares en NaHCO_3 0,1 M, $\text{pH} = 7,5$ (100 U de actividad de tripsina/mL y 10 mM de concentración final, respectivamente) con el homogeneizado del paso anterior. Esta mezcla se colocó dentro de una bolsa de diálisis (punto de corte 10Kda), lo que permitió simular la absorción pasiva de los compuestos polifenólicos y minerales a través de la membrana del intestino delgado. A continuación, la bolsa de diálisis se sumergió en NaHCO_3 0,1 M ($\text{pH} = 7,5$) y se incubó en la oscuridad, con agitación a 40 osc/min durante 3 h a 37 °C. La fracción que pasó a través de la membrana de diálisis (fracción dializable) se separó. Esta porción representó la fracción disponible para absorción en el sistema circulatorio por difusión pasiva en el intestino delgado. La solución restante dentro de la bolsa se consideró es la fracción no dializable. Las muestras dializadas se filtraron, fraccionaron y almacenaron a -80 °C hasta su análisis. La fracción no dializable se sometió a una fermentación colónica simulada, para ello se agregaron 200 μL de un inóculo preparado con materia fecales de ratones (10% p/v en buffer tampón fosfato salino) y se colocaron nuevamente en la membrana de diálisis que fue sumergida en NaHCO_3 ($\text{pH} = 7,5$). Se dejó en agitación a 40°C en oscuridad por 24 h en anaerobiosis. Finalmente se recuperó la fracción dializable (atravesó la membrana de diálisis) y almacenó a -80 °C hasta su análisis. El método de digestión *in vitro* se llevó a cabo por duplicado.

Se estudiaron el contenido de polifenoles totales (TPC), las propiedades antioxidantes (FRAP y ABTS) y el contenido de minerales considerados nutricionalmente relevantes (Cu, Fe, Mn y Zn), de las muestras de panes antes y después de someterse a digestión gastrointestinal *in vitro* y posterior diálisis. También se realizaron blancos de reactivos en cada paso de la digestión *in vitro*.

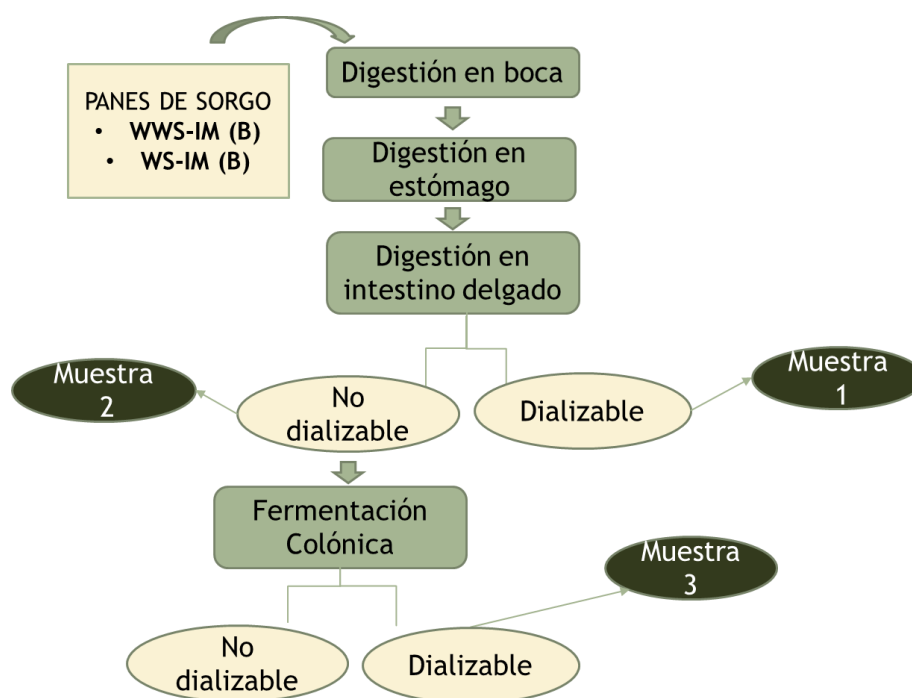


Figura 6.3. Representación esquemática del proceso de digestión *in vitro*.

6.2.8.3 Caracterización de los digestos obtenidos en condiciones *in vitro*

Se determinó el contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante (FRAP y ABTS) en las muestras tomadas de cada etapa de la digestión *in vitro* (Muestras 1, 2 y 3), siguiendo los procedimientos descritos anteriormente en este capítulo en el apartado 6.2.6. Los ensayos se realizaron por cuadruplicado.

6.2.8.4 Determinación de minerales

Se realizó la determinación de Cu, Fe, Mn y Zn en muestras de panes previo al ensayo de digestión *in vitro* (extracto) y en la fracción correspondiente a la absorción luego de la digestión en intestino delgado (Muestra 1, Figura 6.3).

Las muestras de panes no sometidas al ensayo *in vitro* se obtuvieron mediante digestión asistida por microondas. Se pesaron 0,50 g de muestras secas y se transfirieron a tubos de PTFE de 10 mL.

herméticamente sellados. Se agregaron 5,00 mL de HNO_3 , 7 mol L^{-1} y 1,00 mL de H_2O_2 . Los tubos se ubicaron en el sistema de microondas (Anton Par, Austria) y se implementó el programa de calefacción: 1^{er} paso 15 min para tiempo de rampa hasta 190°C y hasta 1200 W; 2^{do} paso: 15 min para el tiempo de mantenimiento a 190 °C, hasta 1200 W. Luego, las muestras fueron reubicadas en tubos volumétricos y diluidas hasta 30,00 mL. Las digestiones se realizaron por duplicado. Simultáneamente se corrió un blanco de reactivos.

Las muestras obtenidas del proceso de digestión *in vitro* fueron filtradas con papel de filtro (Whatman grado 1) para eliminar posibles sólidos en suspensión y posteriormente se evaluaron de igual manera que los extractos obtenidos por microondas.

Las determinaciones elementales se realizaron mediante un espectrómetro de emisión óptica de plasma inducida por microondas (MIP OES Agilent MP 4100, EUA). Para cada analito estudiado, los parámetros y condiciones instrumentales de operación, como la presión del gas nebulizador (NGP) y la posición de visualización (VP) se optimizaron automáticamente mediante el software MP Expert (Agilent Technologies) (Curti et al., 2021). Para calibración analítica del MIP OES, se prepararon soluciones estándar para Cu, Fe, Mn y Zn en una matriz de 0,14 mol L^{-1} HNO_3 , con un estándar multielemental Plasma CAL.

6.2.8.5 Dializabilidad

La dializabilidad (%) es utilizada para estimar los compuestos que estarán disponibles para la absorción en el intestino delgado. El cálculo se realizó según la siguiente ecuación:

$$Dz (\%): Yx100/Z \quad (6.1)$$

Donde Y es el contenido del elemento fuera del tubo de diálisis (mg elemento mineral/100 g de pan), y Z es el contenido del elemento en la muestra de pan (mg elemento mineral/100 g de pan).

6.2.9 Análisis estadístico

Los datos fueron tratados estadísticamente mediante el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2015). Todos los ensayos se realizaron al menos por duplicado y se informó el promedio \pm desvío estándar. Los resultados obtenidos fueron evaluados estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA). En el caso de presentar diferencias, la comparación de las medias se realizó mediante el test de Fisher (LSD) con un nivel de significancia de 0,05. La relación entre los distintos parámetros fue determinada mediante el coeficiente de correlación de Pearson con $p \leq 0,05$. Todos los gráficos se obtuvieron utilizando el software Excel (Office Versión 2016, Microsoft) e InfoStat 2015.

6.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.3.1 Propiedades de las harinas utilizadas en la formulación de panes

Los granos de sorgo blanco fueron acondicionados a 12% de humedad según ensayos anteriormente descritos en el capítulo 2, apartado 2.2.2, previo a la molienda. Las muestras fueron obtenidas mediante: molienda integral (WWS-IM), pulido y molienda (PWS-IM) de impacto, y molienda por rodillos y tamizado (WS-RM), según se detalló en el capítulo 2, apartados 2.2.4, 2.2.5 y 2.2.6.

En este trabajo se utilizó un 83% de harina de sorgo, proporción superior a la analizada previamente en otros estudios (Schober et al., 2005; Trappey et al., 2015; Velázquez et al., 2012; Yousif et al., 2012), 11% de harina de arroz y 5,5% de almidón de mandioca. Además, se incorporó un 1,1% de CMC a fin de mejorar las propiedades de la masa. Este compuesto por sus propiedades hidrofílicas facilita la retención de agua con la consiguiente mejora en las propiedades viscoelásticas de los batidos.

El mayor rendimiento de molienda fue para WWS-IM (99,2%). PWS-IM obtuvo el mayor rendimiento de molienda (72,4%) dentro de las harinas no integrales siendo el menor (51,6%) para la muestra WS-RM. Los rendimientos de molienda fueron similares a los obtenidos en el Capítulo 2, apartado 2.3.2 y a los de harinas empleadas para la elaboración de bizcochuelos (Capítulo 4, apartado 4.3.1).

Tabla 6.1. Parámetros de RVA de las harinas utilizadas en la elaboración de panes.

Muestra	VP (cP)	BD (cP)	VF (cP)	SB (cP)	TP (°C)
WWS-IM	924 ^a	63 ^a	1966 ^a	1104 ^a	90,1 ^b
PWS-IM	1115 ^b	133 ^c	2338 ^b	13588 ^b	90,0 ^b
WS-RM	1851 ^c	104 ^b	2988 ^c	1240 ^{ab}	86,4 ^a

WWS: harina de sorgo blanco integral, WS: harina de sorgo blanco; IM: molienda de impacto; RM: molienda por rodillos; P: pulido; VP: viscosidad pico; BD: breakdown; VF: viscosidad final; SB: setback; TP: temperatura de pasting.

Al igual que lo observado en el Capítulo 2, apartado 2.3.4, los perfiles de viscosidad de las harinas aumentaron significativamente a medida que el rendimiento de molienda disminuyó. WS-RM presentó el mayor PV y FV, y la menor TP ($p < 0,05$) (Tabla 6.1).

La distribución de tamaño de partículas fue similar a la descrita en el Capítulo 2, apartado 2.3.3 debido a que se efectuó el mismo acondicionamiento y molienda de los granos (Tabla 6.2). PWS-IM presentó el mayor D_{4,3} pero las diferencias sólo fueron significativas respecto a WS-RM. WWS-IM exhibió el mayor valor de índice de polidispersidad, lo que indica una mayor heterogeneidad en los tamaños de partículas de la muestra, relacionado con la presencia de salvado.

Tabla 6.2. Tamaño de partículas de las harinas empleadas en la elaboración de panes.

Muestra	D 10 (µm)	D 50 (µm)	D90 (µm)	Av (D _{4,3}) (µm)	Span
WWS-IM	30,3 ^a	437,8 ^a	786,58 ^a	431,6 ^a	1,9 ^b
PWS-IM	187,6 ^b	564,7 ^a	883,6 ^b	561,6 ^b	1,2 ^a
WS-RM	156,3 ^b	456,7 ^a	777,8 ^a	468,7 ^{ab}	1,4 ^a

Los valores se expresan como media ($n = 2$). Letras diferentes en la misma columna expresan diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido; IM: molienda de impacto; RM: molienda por rodillos.

Por otra parte, también se evaluó el color de las harinas siendo más claras las harinas obtenidas luego de pulido o tamizado. De la misma manera Trappey et al. (2015) y ensayos previos de grupo (Curti et al., 2022) describieron que a medida que la tasa de extracción de harina de sorgo (rendimiento de molienda) aumentó, el valor de a^* disminuyó significativamente. WS-RM obtuvo el menor rendimiento de molienda, sin embargo, no fue la muestra más clara, cómo lo indica su valor de L^* (Tabla 6.3). A su vez también obtuvo la mayor viscosidad de pico y final. La misma observación fue realizada al evaluar diferentes condiciones y tipos de molienda en el capítulo 2, apartado 2.3.4.

Tabla 6.3. Determinación de color de las harinas utilizadas en la elaboración de panes.

Muestra	L*		a*		b*	
WWS-IM	76,06	a	1,73	c	15,65	a
PWS-IM	87,50	c	0,16	a	15,71	a
WS-RM	79,84	b	1,22	b	14,93	a

Los valores se expresan como media ($n = 2$). Letras diferentes en la misma columna expresan diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS: harina de sorgo blanco integral; PWS: harina de sorgo blanco pulido; IM: molienda de impacto; RM: molienda por rodillos.

6.3.2 Caracterización de los batidos/masas para panes

Para caracterizar las propiedades reológicas de los batidos se utilizó un ensayo de extrusión. Este consiste en aplicar una fuerza de compresión, mediante un embolo, a un material que se encuentra en un vaso contenedor hasta que comience a fluir en el sentido contrario al que se aplica la fuerza, llamándose ensayo de extrusión inverso. Se registra una curva de fuerza en función del tiempo. La fuerza requerida para lograr la extrusión fue utilizada como un indicador de la resistencia a fluir del batido.

Tabla 6.4. Fuerza de extrusión de los diferentes batidos.

Muestra	Fuerza de extrusión (N)
WWS-IM	0,858 ^a
PWS-IM	3,306 ^b
WS-RM	0,731 ^a

Los valores se expresan como media ($n = 2$). Letras diferentes en la misma columna expresan diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS: harina de sorgo blanco integral, WS: harina de sorgo blanco; IM: molienda de impacto; RM: molienda por rodillos; P: pulido.

La utilización de harina obtenida de granos pulidos y molidos por impacto (PWS-IM) condujo a la obtención de batidos que requirieron más del triple de fuerza para la extrusión respecto a las demás muestras (Tabla 6.4). Los resultados informados entre la relación de la consistencia de los batidos y la calidad de los panes libres de gluten son contradictorios. Renzetti y Arendt (2009) sugirieron que la disminución en la consistencia del batido puede mejorar el desarrollo de la masa debido a una menor resistencia a la expansión durante la prueba de panificación, mientras que otros autores, afirmaron que una mayor consistencia del batido conduce a panes con mayor volumen

específico (VE), debido a que el aumento de la viscosidad mejora el desarrollo de la masa y la retención de gas, lo que aumenta el volumen del pan (Marco y Rosell, 2008; Sciarini et al., 2010).

6.3.3 Caracterización de los panes

6.3.3.1 Textura

Las propiedades mecánicas de la miga de pan son frecuentemente conectadas a la percepción sensorial de frescura y elasticidad por parte de los consumidores (Heiniö et al., 2016). Actualmente hay disponibles métodos que permiten obtener parámetros asociados al proceso de masticación y así describir el pan con respecto a sus propiedades mecánicas y características de textura (Liu y Scanlon, 2003).

La frescura de la miga se asocia con su estructura específica y, especialmente con las propiedades de textura de las paredes celulares que forman las celdas de aire en el pan (Angioloni y Collar, 2009; Liu y Scanlon, 2003). La masa de pan sin gluten normalmente se prepara con una proporción mucho mayor de agua, entre 80 y 110% en relación con la harina, en comparación con aproximadamente el 65% para una masa de harina de trigo.

El agua, además de hidratar los gránulos de almidón, juega también un papel crítico en el envejecimiento del pan; la retrogradación del almidón requiere la incorporación de agua a la estructura cristalina disminuyendo la cantidad disponible para facilitar las interacciones intermoleculares (Barrera et al., 2007). Esto tiene un efecto importante en la firmeza de la miga ya que la pérdida de estas interacciones provoca una disminución de la cohesión y conduce al desmoronamiento (Ronda y Roos, 2011).

El análisis de textura de los panes (Tabla 6.5), evidenció diferencias significativas entre las muestras, especialmente en relación con la dureza, la gomosidad y la masticabilidad. La dureza o firmeza es un parámetro que se mide de manera directa y se relaciona con la resistencia necesaria para comprimir la muestra, mientras que los parámetros de gomosidad y masticabilidad son secundarios (calculados).

Los panes elaborados con harina WS-RM presentaron la mayor dureza y gomosidad, mientras que los más blandos fueron los realizados con PWS-IM. El pan obtenido con WWS-IM presentó mayor dureza y gomosidad que el elaborado con PWS-IM, pero menor que el realizado con WS-RM. Sin embargo, al analizar la masticabilidad no hubo diferencias significativas entre WWS-IM y WS-RM, pero si con el pan obtenido con PWS-IM, siendo menor para este último. Resultados similares fueron encontrados por Abdelghafor et al. (2011) quienes informaron que panes elaborados con mayor proporción de sorgo como sustitución parcial de harina de trigo presentaron un incremento en la dureza, y fue mayor en aquellos elaborados con harina de sorgo integral, pero no se evidenciaron cambios en la masticabilidad.

Tabla 6.5. Características tecnológicas de los panes elaborados con harina de sorgo.

Muestra	WWS-IM	PWS-IM	WS-RM
VE (cm ³ /g)	4,7 a	4,7 a	4,8 a
Dureza (N)	20,3 b	14,9 a	25,9 c
Gomosidad (N)	15,3 b	11,0 a	25,7 c
Cohesividad(J)	1,08E ⁻⁰⁴ a	8,95E ⁻⁰⁵ a	8,88E ⁻⁰⁵ a
Masticabilidad (J)	1,91E ⁻⁰³ b	1,33E ⁻⁰³ a	2,31E ⁻⁰³ b
L*	45,8 a	63,9 c	54,0 b
a*	4,8 c	1,1 a	2,8 b
b*	18,7 b	18,3 b	17,4 a
N° Alvéolos/mm ²	206,5 b	113,5 a	253,5 c
Tamaño alvéolos (mm ²)	1,369 b	2,1085 c	1,031 a
% Área de alvéolos	30,845 b	26,4855 a	28,916 ab
Uniformidad	4,88 a	3,76 a	5,86 a

Los valores se expresan como media (n = 2). Letras distintas en una misma fila corresponden a valores significativamente diferentes (p<0,05). VE: Volumen específico; WWS: harina de sorgo blanco integral, PWS: harina de sorgo blanco pulido; IM: molienda de impacto; RM: molienda de rodillos.

6.3.3.2 Volumen específico

No se observaron diferencias significativas (p<0,05) para el volumen específico de panes producidos con todas las harinas de sorgo estudiadas (Tabla 6.5). Sin embargo, en el análisis de imágenes se puede apreciar que el pan elaborado con WS-RM presentó una marcada depresión en la zona central a diferencia de las otras muestras, probablemente como resultado de la presión

ejercida por los gases y el vapor sobre la miga en formación, produciendo el colapso de la estructura (Sciarini et al., 2010, 2012). Gan et al. (1989, 1992) afirmaron que los componentes que no forman parte del endospermo del trigo (germen y salvado) fueron responsables de la depresión del volumen del pan. Trappey et al. (2015), concordaron con esos resultados al encontrar una disminución en el volumen específico de panes libres de gluten elaborados con harina de sorgo al aumentar la tasa de extracción (es decir, un aumento en el contenido de fibra). Sin embargo, en la presente investigación el pan elaborado con la harina que obtuvo la menor tasa de extracción (WS-RM), no presentó mayor volumen y presentó una marcada depresión central. Una posible explicación puede encontrarse al analizar los perfiles de *pasting* de las harinas, donde se observó que la viscosidad final alcanzada por la harina molida por rodillos (Tabla 6.1) fue significativamente mayor que el resto de las muestras. Esto pudo deberse a una mayor proporción de almidón disponible en la muestra para la acción de las levaduras (producción de gas) provocando un mayor crecimiento de la pieza, pero la ausencia de la red gluten no permitió sostenerlo y la estructura colapsó luego del horneado.

El pan elaborado con PWS-IM no presentó depresión central y tuvo una miga más homogénea, a diferencia de los otros panes (Figura 6.4), lo que sugiere una mayor retención de gas durante el horneado. De todas maneras, es necesario considerar que las diferencias en el volumen específico no fueron significativas a pesar de que el pan obtenido con WS-RM presentara una mayor depresión central. Los volúmenes específicos de los panes se encontraron entre 4,7 cm³/g y 4,8 cm³/g. Estos resultados fueron superiores a los reportados por Angioloni y Collar, (2013) al utilizar un 40% de harina de sorgo blanco (3,2 cm³/g) como sustitución de harina de trigo en la elaboración de panes. También Schober et al. (2005) informaron panes con volúmenes significativamente menores (1,77 cm³/g -1,84 cm³/g) a los obtenidos en este estudio, para diferentes panes elaborados con harinas de sorgos blancos y rojos en una proporción 70/30 harina de sorgo/almidón de maíz. Probablemente las discrepancias encontradas con este estudio se deban a la formulación empleada, ya que utilizaron harina de maíz, goma xántica y proteínas lácteas a diferencia del presente trabajo.

Por otra parte, el análisis de la distribución de alveolos nos permite observar si se produjo una adecuada incorporación de aire durante el batido y si la estructura formada fue capaz de retenerlo durante el horneado. En el pan de trigo, el grado en que se forman las celdas de aire depende de las interacciones proteína-almidón (específicamente del gluten) que proporcionan características viscoelásticas particulares a la masa. Estas permiten la retención de los gases desarrollados durante

la fermentación de la levadura y el horneado la masa, formando una estructura similar a una esponja (Lagrain et al., 2012). El pan sin gluten carece de los medios necesarios para producir dicha red, por ello el mecanismo predominante para formar celdas de aire, o alvéolos es durante el batido. El dióxido de carbono, que se produce como subproducto de la fermentación de la levadura, difunde en las celdas de aire formadas durante el batido y hace que se expandan (Trappey et al., 2015).

Además, como generalmente en panes libres la retención de gas es más difícil, se incorporan aditivos como los hidrocoloides que mejoran el desarrollo de la masa y la retención de gas mediante el aumento de la viscosidad del sistema (Lazaridou et al., 2007; Mariotti et al., 2013; Sciarini et al., 2010). También en la elaboración de pan sin gluten se suelen utilizar emulsionantes que, debido a la presencia de residuos hidrofílicos e hidrofóbicos en su estructura, pueden interactuar con diferentes componentes de la harina y la masa, lo que permite aumentar la estabilidad de un sistema termodinámicamente inestable. Esto da como resultado un refuerzo en la estructura de la masa y una disminución la firmeza de la miga (Demirkesen et al., 2010; Onyango et al., 2009).

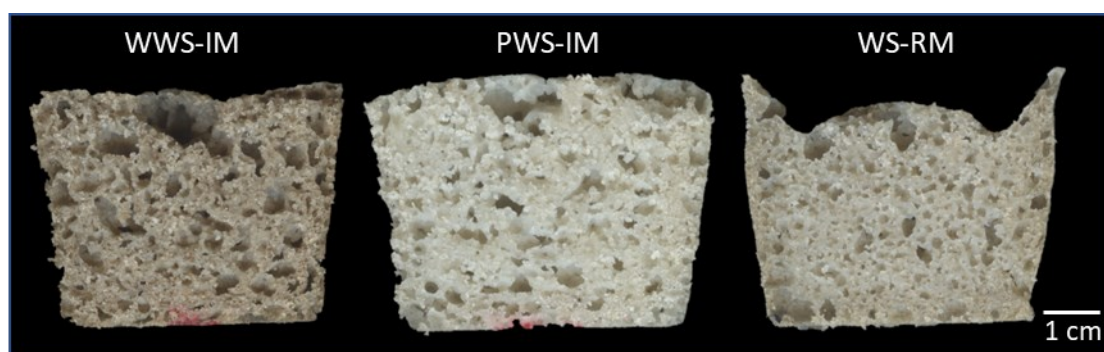


Figura 6.4. Fotografías de panes de sorgo obtenidos con harina de sorgo blanco integral (WWS-IM), pulido más molienda de impacto (PWS-IM) y molienda por rodillos más tamizado (WS-RM).

El porcentaje de área de miga ocupado por alvéolos fue mayor para los panes elaborados con las harinas WWS-IM y WS-RM, que a su vez presentaron alvéolos de menor tamaño ($p < 0,001$) pero mayor cantidad que los realizados con PWS-IM (Tabla 6.5). También, se observó que a medida que aumentó la resistencia a la extrusión de los batidos, el total de alveolos en los panes disminuyó al igual que el área que estos ocuparon (Tabla 6.5). Los panes obtenidos con PWS-IM presentaron el mayor tamaño de alveolos y esto se relacionó con una menor dureza, gomosidad y masticabilidad ($p < 0,001$). Además, fueron los únicos que no tuvieron un colapso de la estructura, lo que indicaría que una mejor retención del gas durante la cocción.

En la Figura 6.4 se puede apreciar una distribución uniforme de los alveolos en todas las muestras, lo que se refuerza con el análisis estadístico donde este parámetro no evidenció diferencias significativas ($p > 0,05$). Schober et al. (2005) informaron, al igual que en este estudio, que los panes de sorgo con mayor número de alveolos fueron los de mayor dureza ($r = -0,712$; $p < 0,05$), mientras que los más blandos presentaron alvéolos de mayor tamaño ($r = -0,727$; $p < 0,05$).

El pan de buena calidad se relaciona con una alta porosidad y una estructura de la miga abierta y homogénea (Angioloni y Collar, 2009). Si bien se han publicado varias investigaciones sobre la calidad de los panes libres de gluten (Machado Alencar et al., 2015; Shin et al., 2013), estas se han centrado principalmente en la evaluación de la influencia del tipo de materias primas. Sin embargo, algunos trabajos han remarcado el efecto que posee el tamaño de partícula de la harina utilizada en panes. Así, se ha demostrado que este es uno de los factores más importante al elaborar panes libres de gluten (de la Hera et al., 2014; Sciarini et al., 2020).

El análisis de tamaño promedio de partículas (D4,3) evidenció diferencias significativas entre WWS-IM y PWS-IM, pero no con WS-RM, siendo PWS-IM la que presentó mayor D4,3. Respecto al índice de polidispersidad, WWS-IM presentó el mayor valor ($p = 0,0365$), lo que indica una mayor heterogeneidad de tamaños de las partículas que conforman la harina, asociada en este caso a la presencia de salvado que probablemente se molió de manera menos homogénea que el endospermo. Las harinas con mayor tamaño de partículas promedio (D4,3), se relacionaron con la obtención de panes con una menor área de la miga ocupada por alveolos, pero estos fueron de mayor tamaño, tal como se observó en la muestra formulada con PWS-IM.

6.3.3.3 Color

El color de los panes se encuentra relacionado con los ingredientes utilizados en su elaboración y la temperatura alcanzada durante la cocción. A fin de obtener una comparación uniforme de las muestras se analizó el color de la miga de los panes. La temperatura de la miga nunca excede el punto de ebullición del agua (100 °C), mientras que en la corteza se alcanzan temperaturas cercanas a los de 205 °C, cuando la temperatura del horno permanece constante en un rango de 220-240 °C (Chang, 2006).

En general, un valor L^* más bajo indica un color más oscuro, un valor positivo de a^* se asocia con el enrojecimiento, mientras que un valor más alto de b^* indica una coloración más amarillenta. El pan elaborado con WWS-IM presentó los mayores valores de a^* y menores de L^* , coincidente con un color más oscuro de la miga en la gama de los marrones. El color más claro fue obtenido por el pan obtenido con PWS-IM, siendo en este caso los valores de L^* y a^* significativamente superiores e inferiores respectivamente ($p < 0,001$) (Tabla 6.5). La presencia de salvado en WWS-IM, otorgó un color más oscuro y amarronado tanto a las harinas como a sus respectivos panes.

Yousif et al. (2012), indicaron que una sustitución de hasta un 50% de harina de trigo por harina de sorgo blanco integral condujo a valores de L^* similares a los de panes elaborados íntegramente con trigo (L : 70-72). Esto supone una mayor aceptabilidad por los consumidores tradicionales quienes valoran positivamente la apariencia blanquecina del pan (Carson et al., 2000). Sin embargo, los autores reportaron que los panes elaborados con la adición de sorgo en proporciones variables (entre 30% y 50%) fueron ponderados de manera significativamente mejor en una prueba de análisis sensorial que el control (100% harina de trigo). En esta tesis la utilización de un 83% de PWS-IM permitió obtener panes con un valor de L^* similar (63,9) a los reportados por Yousif et al. (2012), en el estudio previamente citado con la adición de solo un 30% de harina de sorgo blanco.

Sin embargo, es importante mencionar que en los últimos años la preferencia de los consumidores ha ido cambiando y son bien valorados aquellos panes elaborados con harinas de granos enteros, que aportan mayor contenido de fibra y minerales, a pesar de impartir colores más oscuros (Milani et al., 2022). La ingesta de fibra dietética, que suele ser particularmente baja para quienes siguen una dieta sin gluten, puede modificar la velocidad a la que se digieren y/o absorben nutrientes como el almidón y las proteínas (Capriles y Arêas, 2013). En este sentido, se pone un mayor énfasis en el estado nutricional de los pacientes celíacos, dado que los carbohidratos, proteínas y lípidos suelen consumirse en proporciones desequilibradas, mientras que la ingesta de algunos nutrientes esenciales suele ser deficiente (Thompson, 2000; Thompson et al., 2005).

6.3.3.4 Identificación de compuestos polifenólicos por HPLC-DAD-ESI-MS/MS

Para la caracterización del perfil de compuestos antioxidantes en harinas y panes de sorgo se utilizó un equipo de HPLC-DAD-ESI-MS/MS bajo la metodología descrita en la sección 6.2.7. Se identificaron tentativamente 15 compuestos en las muestras, 14 derivados fenólicos pertenecientes a las familias de poliaminas, ácidos fenólicos, flavonoides y un hidroxiácido graso. Todos fueron identificados en base a su masa exacta, patrón de fragmentación y orden de elución comparando con información de publicaciones previas. Los compuestos identificados en esta tesis ya han sido previamente reconocidos en muestras de sorgo (Kang et al., 2016; Ofosu et al., 2021; Pontieri et al., 2021; Rao et al., 2018; Xiong et al., 2019). Todos los compuestos fueron identificados en harinas y panes. Sin embargo, debido a que no se pudo realizar la cuantificación, no fue posible determinar si hubo cambios en sus concentraciones, luego del proceso de elaboración de los panificados.

En la Tabla 6.6 se enumeran los 15 compuestos identificados con sus tiempos de retención, fórmulas moleculares, iones precursores de m/z experimentales y calculadas, errores (ppm) y fragmentos de MS/MS.

Tabla 6.6. Identificación de compuestos fitoquímicos en extractos hidrometanólicos de harina y pan de sorgo. Características cromatográficas y moleculares de cada compuesto identificado.

Nº	Tr (min)	Nombre del Compuesto	Fórmula Molecular	[M-H] ⁻ experimental (m/z)	[M-H] ⁻ calculado (m/z)	Error (ppm)	Fragmentos MS/MS (m/z)
1	12,1	Dicafeoil espermidina I	C ₂₅ H ₃₀ N ₃ O ₆	468,2107	468,2140	7,1	332, 306
2	12,5	Dicafeoil espermidina II	C ₂₅ H ₃₀ N ₃ O ₆	468,2210	468,2140	7,4	332, 306
3	12,7	Cafeoil feruloil espermidina	C ₂₆ H ₃₃ N ₃ O ₆	482,2274	482,2297	4,7	332, 306
4	14,1	2-O cafeoil glicerol	C ₁₂ H ₁₃ O ₆	253,0736	253,0718	-7,1	179, 161
5	15,3	Ácido Cafeico	C ₉ H ₇ O ₄	179,0331	179,0350	-10,4	
6	16,8	Coumaroil glicerol	C ₁₂ H ₁₃ O ₅	237,0778	237,0768	-4,1	
7	22,7	Dicafeoil glicerol	C ₂₁ H ₁₉ O ₉	415,1058	415,1032	5,6	253, 179, 161
8	24,4	Coumaroil cafeoil glicerol	C ₂₁ H ₂₀ O ₈	399,1080	399,1085	1,3	253, 179, 235
9	24,6	Feruloil cafeoil glicerol	C ₂₂ H ₂₁ O ₉	429,1174	429,1191	3,9	193, 235
10	25,4	Naringenina	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	271,0590	271,0612	8,2	151, 177
11	26,1	Luteolina	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	285,0379	285,0405	8,9	
12	26,5	Coumaroil-feruloil-glicerol	C ₂₂ H ₂₂ O ₈	413,1208	413,1242	0,8	193, 285
13	29,1	Apigenina	C ₁₅ H ₉ O ₅	269,0435	269,0455	9,3	225
14	29,5	Hispidulina	C ₁₆ H ₁₂ O ₆	299,0563	299,0561	-14,9	284
15	31,4	Ácido tri-hidroxi-octadecenoico	C ₁₈ H ₃₃ O ₅	329,2315	329,2333	-6,8	211, 229

Tr= tiempo de retención

Poliaminas

Las poliaminas se encuentran en todas las células vivas, incluidos los microorganismos, las plantas y los animales. Debido a su estructura, las poliaminas son compuestos relativamente estables, capaces de resistir condiciones ácidas. Su actividad antioxidante afecta principalmente a los lípidos de membrana y los ácidos nucleicos (Handa et al., 2018). La espermina es la poliamina con mayores propiedades antioxidantes, asociada a su mayor número de cargas positivas. El principal mecanismo de acción antioxidante de las poliaminas es la quelación de metales, lo que previene la formación de hidroperóxidos y retrasa la generación de compuestos de oxidación secundarios (Muñoz-Esparza et al., 2019). En esta familia se ubicaron 3 de los 15 compuestos identificados.

Los compuestos **1** y **2** mostraron un ion molecular M-H- de m/z 468. En ambos casos dieron un fragmento de m/z 332, por la pérdida de 136 Da correspondiente a un cafeoil y un segundo fragmento por la pérdida de 162 Da correspondiente al segundo cafeoil. La diferencia entre ambas fragmentaciones es la inclusión o no del grupo cetona en la fragmentación. Teniendo en cuenta la masa exacta, el patrón de fragmentación y publicaciones previas (Kang et al., 2016; Rao et al., 2018), ambos compuestos fueron tentativamente identificados como isómeros de dicafeoil espermidina (Figura 6.5 a).

El compuesto **3** presentó un ion molecular de m/z de 482, dando su fragmentación un pico base de 332, seguido de un fragmento de 306. Hay una pérdida de 150 y 176 respectivamente correspondientes al grupo ferurol. En ambos la diferencia es la retención del grupo cetona. Teniendo en cuenta la masa exacta, el patrón de fragmentación y publicaciones previas (Kang et al., 2016), el compuesto **3** fue tentativamente identificado como cafeoil ferurol espermidina (Figura 6.5 b).

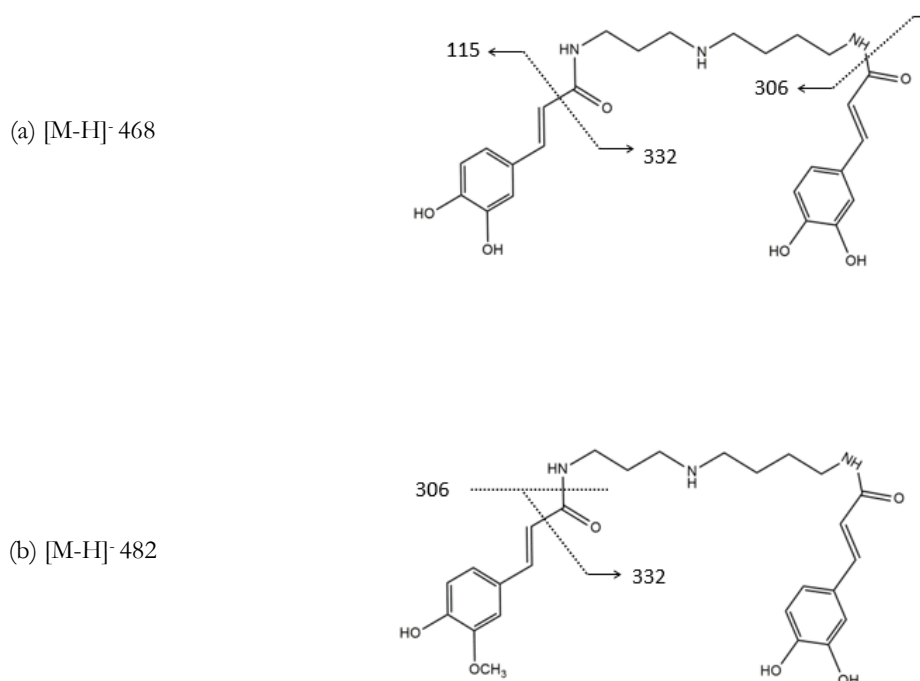


Figura 6.5. Fragmentación propuesta para dicafeoil espermidina (a) y cafeoil feruloil espermidina (b).

Ácidos fenólicos

Los ácidos fenólicos son los compuestos fenólicos más abundantes presentes en los cereales. En el sorgo, entre el 70% y el 95% de los ácidos fenólicos están unidos covalentemente a los polisacáridos de la pared celular (Chiremba et al., 2012; Girard y Awika, 2018). Debido al enlace covalente con los polisacáridos de la pared celular, los ácidos fenólicos unidos se metabolizan principalmente en el colon donde se liberan de la pared celular y pueden pasar a la circulación sistémica. De esta manera pueden contribuir a los efectos biológicos beneficiosos del consumo de cereales integrales (Vitaglione et al., 2015).

De los 15 compuestos identificados 7 pertenecieron a la familia de ácidos fenólicos. Todos ellos son derivados del ácido hidroxicinámico.

El compuesto **4**, presentó un ion molecular de m/z de 253 cuyos fragmentos fueron el m/z 179 (M-H-74)- y m/z 161 (M-H-92)- los cuales corresponden a un residuo de glicerol. De acuerdo

con la información obtenida y datos de la bibliografía (Rao et al., 2018) este compuesto fue tentativamente identificado como cafeoil glicerol.

El compuesto **5**, dio un ion molecular de m/z de 179, y fue identificado con respecto al estándar autentico como ácido cafeico. El compuesto **6** presentó un ion molecular de m/z de 237. En este caso la identificación se llevó a cabo por la masa exacta y orden de elución en comparación con bibliografía (Kang et al., 2016) y se identificó tentativamente como cumaroil glicerol.

El compuesto **7** presentó un ion molecular de m/z de 415 con fragmentos de 253, 179 y 161 Da. El fragmento de 253 corresponde a la pérdida de 162 Da del residuo caffeoil. El fragmento de 179 $[M-H-74]^-$ y el de 161 $[M-H-92]^-$ corresponden a la pérdida de un residuo de glicerol. En base los estos datos experimentales y bibliografía (Kang et al., 2016) este compuesto fue tentativamente identificado como dicafeoil glicerol.

El compuesto **8** dio un ion molecular de m/z de 399, presentando tres fragmentos de m/z de 253, y 179. Como puede observarse, los fragmentos corresponden a la fragmentación del cafeoyl glicerol, por lo que este compuesto fue identificado tentativamente como coumaroil cafeoyl glicerol. El compuesto **9** presentó un ion molecular de 429. Los fragmentos observados de m/z 235 y 193, corresponden al residuo feruol liberado. Teniendo en cuenta el patrón de fragmentación y bibliografía (Kang et al., 2016), el compuesto fue tentativamente identificado como feruol cafeoil glicerol.

El compuesto **12** presentó un ion molecular de m/z de 413 y fragmentos de 193 y 285 Da. El fragmento de 193 Da corresponde al ácido ferúlico y el de 285 Da a la pérdida del residuo cumaroil. En base a esta información este compuesto fue identificado tentativamente como coumaroil feruloil glicerol.

Flavonoides

De los 15 compuestos identificados 4 correspondieron a la familia de los flavonoides. Los compuestos **10**, **11** y **13** fueron identificados como naringenina (flavanona), luteolina (flavona) y apigenina (flavona) en comparación con la masa exacta, patrón de fragmentación y tiempo de retención con los estándares puros correspondientes. En general, la luteolina y la apigenina son las

flavonas dominantes en sorgo; sin embargo, en otros cereales, las flavonas existen principalmente en forma de glucósido (C-glucósidos) (Dykes et al., 2009, 2011; Dykes & Rooney, 2006). Los O-glucósidos son más bioaccesibles que los C-glucósidos ya que son hidrolizados con mayor facilidad en el medio ácido estomacal y, por lo tanto, tienen una mayor bioactividad en bajas concentraciones (Yang et al., 2014, 2015). Generalmente las variedades de sorgo con pericarpio rojo y amarillo poseen altos niveles de estas flavonas (Dykes et al., 2009, 2011).

Las flavanonas se encuentran raramente en los granos de cereales, incluso en el sorgo, solo están presentes en fenotipos específicos, siendo naringina el principal compuesto identificado (Girard y Awika, 2018). Las flavanonas de sorgo existen principalmente como O-glucósidos lo que hace que sean fácilmente accesibles en el tracto gastrointestinal (Yang et al., 2015).

El compuesto **14** presentó un ion molecular de m/z de 299 con un fragmento principal de 284 Da generado por la pérdida de un metilo. De acuerdo a bibliografía (Kang et al., 2016; Ofosu et al., 2021) este compuesto fue tentativamente identificado como hispidulina.

Otros compuestos

El compuesto **15** con un ion molecular de m/z de 329 y fragmentos de 211 y 229 Da que corresponden a pérdidas de moléculas de agua y restos alifáticos fue tentativamente identificado como un hidroxiácido graso, ácido trihydroxy octadecenoico, en comparación a publicaciones previas (Kang et al., 2016).

6.3.4 Digestibilidad *in vitro* de panes

Para ejercer un beneficio para la salud, los compuestos de interés presentes en los alimentos primero deben ser bioaccesibles (Seeram, 2008). Esto depende únicamente de la digestión y liberación de los compuestos de la matriz alimentaria para convertirlos en accesible para su absorción. En cambio, la biodisponibilidad, que se define como la cantidad de un nutriente ingerido que se absorbe y está disponible para funciones fisiológicas, depende de la digestión, liberación de la matriz alimenticia, absorción por vía intestinal y transporte a las células del cuerpo (Hall y Guyton, 2011). Debido a que la biodisponibilidad incluye la bioactividad de los compuestos en las

células diana, con los métodos *in vitro* es posible determinar la “dializabilidad”. Esto es útil para estimar los compuestos que estarán disponibles para la absorción en el intestino delgado (Etcheverry et al., 2012).

En este estudio se realizó una digestión *in vitro* para determinar las fracciones potencialmente bioaccesibles y dializables de polifenoles y su actividad antioxidante. También se realizó la determinación de minerales nutricionalmente relevantes durante el proceso de digestión. Se utilizaron los panes previamente elaborados con harina de sorgo integral (WWF-IM) y pulido (PWS-IM), ambas obtenidas por molienda de impacto.

6.3.4.1 Determinación del contenido de polifenoles y actividad antioxidante

Inicialmente se determinó el contenido de polifenoles y la actividad antioxidante de las harinas y los respectivos panes elaborados (Tabla 6.7). La harina WWS-IM obtuvo el mayor valor de polifenoles y también su capacidad antioxidante, determinada por FRAP y ABTS, fue significativamente superior. Como se mencionó anteriormente los polifenoles se localizan mayoritariamente en la capa externa que recubre al grano (Xiong et al., 2019), por lo que es esperable que la harina que conservó íntegramente el salvado posea una mayor presencia. En general los valores estuvieron de acuerdo con los reportados para TPC en harina de sorgo blanco integral por Palavecino et al. (2016) y fueron superiores que los informados por Rao et al. (2018), utilizando el mismo tipo de granos. Esta variación pudo deberse a factores como diferencias en las variedades de sorgo, procedimiento de extracción y/o el solvente de extracción utilizado (Barros et al., 2013).

Los extractos de los panes evidenciaron la misma tendencia que las harinas, siendo mayor el TPC en la muestra integral al igual que su capacidad antioxidante. Los valores de TPC en panes fueron menores que los reportados por Yousif et al. (2012) en panes elaborados con un 40% de harina de sorgo blanco ($0,49 \pm 0,02$ mg GAE/g), lo que es consecuente también con una menor capacidad antioxidante que la informada por estos autores.

Ambos métodos de determinación de la capacidad antioxidante (FRAP y ABTS) revelaron una correlación positiva y significativa con el contenido de polifenoles totales ($r= 0,87$; $p<0,001$ y $r=$

0,91; $p < 0,00001$). Esto indica que los compuestos polifenólicos medidos presentaron efectivamente actividad antioxidante. Los resultados están de acuerdo con los obtenidos por Blanco Canalis et al. (2020) al evaluar la capacidad antioxidante de galletitas enriquecidas con pulpa de frutas, que sugirieron que los compuestos antioxidantes podrían actuar como donantes de electrones y también de hidrógenos.

Tabla 6.7. Determinación del contenido de polifenoles y actividad antioxidante durante el proceso de digestión *in vitro*.

	Muestra	TPC (mg GAE/100 g)	FRAP (mmol Trolox/100 g)	ABTS (mg TE/100 g)
Determinación en extractos de harinas y panes				
Extracto harinas	WWS-IM	53,63 ± 2,54 ^e	0,29 ± 0,03 ^e	13,67 ± 0,49 ^c
	PWS-IM	21,29 ± 0,06 ^c	0,18 ± 0,02 ^{cd}	7,89 ± 0,61 ^b
Extracto panes	WWS-IM	41,46 ± 9,45 ^d	0,26 ± 0,02 ^e	13,52 ± 1,77 ^c
	PWS-IM	18,50 ± 0,63 ^c	0,13 ± 0,02 ^{bc}	7,83 ± 0,18 ^b
Digestión <i>in vitro</i> de panes				
Fracción dializable (M1)	WWS-IM	0,43 ± 0,01 ^a	0,02 ± 0,00 ^a	18,35 ± 0,38 ^d
	PWS-IM	0,19 ± 0,09 ^a	0,01 ± 0,00 ^a	17,54 ± 0,48 ^d
Fracción no dializable (M2)	WWS-IM	5,63 ± 0,66 ^{ab}	0,19 ± 0,02 ^d	ND
	PWS-IM	7,21 ± 0,8 ^b	0,14 ± 0,02 ^{bc}	ND
Fermentación Colónica (M3)	WWS-IM	2,46 ± 0,08 ^{ab}	0,11 ± 0,01 ^b	1,23 ± 0,19 ^a
	PWS-IM	0,84 ± 0,09 ^b	0,02 ± 0,00 ^a	1,76 ± 0,36 ^a

Los valores se expresan como medias ($n = 4$) ± su desviación estándar. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$). TPC: Polifenoles totales; WWS-IM: Harina de sorgo blanco integral; PWS-IM: Harina de sorgo blanco pulido.

Posteriormente se sometió a los panes a un ensayo de digestión *in vitro* y se determinó el TPC y la actividad antioxidante en las diferentes etapas. Los polifenoles pueden ejercer su poder antioxidante en el organismo a través de diferentes vías. Aunque las técnicas *in vitro* no muestran ningún efecto biológico real, representan un buen enfoque para evaluar el efecto antioxidante de estos extractos y el mecanismo químico de acción (Girard y Awika, 2018). La fracción dializable corresponde a los polifenoles que podrían ser absorbidos por difusión pasiva. Después de la masticación y la digestión gástrica, se simuló la digestión intestinal y se recolectaron muestras de la digestión intestinal (fracción dializable, M1) y de la que prosigue a su paso por el colon (fracción

intestinal no dializable, M2). También se tomó una muestra de la fracción dializable luego de la fermentación colónica (fracción dializable, M3).

La absorción intestinal (M1) es lo que determina la biodisponibilidad potencial. En ella los TPC disminuyeron significativamente en todas las muestras en comparación con los extractos de panes en metanol/agua (80:20 v/v), previos a la digestión, aunque las diferencias entre las muestras no fueron significativas. Estos resultados eran esperados ya que se sabe que los disolventes orgánicos son más eficientes para las extracciones de TPC que los disolventes utilizados en la digestión humana (Blanco Canalis et al., 2020). Sin embargo, también el cambio de pH pudo haber conducido a la inestabilidad e hidrólisis de los compuestos liberados en las primeras etapas por las enzimas digestivas.

La capacidad reductora también disminuyó significativamente en todas las muestras consideradas bioaccesibles luego de la digestión intestinal (fracción dializable, M1). Los valores de capacidad reductora oscilaron entre 0,01 (PWS-IM) y 0,02 (WWS-IM) mmol Trolox/100 g de muestra y no evidenciaron diferencias significativas entre ellas. Sin embargo, la actividad antirradicalaria aumentó significativamente en esta etapa, con relación a los extractos previos a la digestión y se situó en 17,54 y 18,35 mg Te/100 g muestra, para panes formulados con PWS-IM y WWS-IM, respectivamente. Una posible explicación es que los polifenoles podrían sufrir despolimerización durante el procesamiento/digestión y, como resultado, algunos podrían mejorar o reducir su actividad antioxidante inicial e incluso hasta perder su actividad (Bustos et al., 2020).

El TPC de polifenoles en la fracción no absorbida de la digestión intestinal (M2) se encontró entre 5,63 y 7,21 mmol Trolox/100 g de muestra para los panes obtenidos con WWS-IM y PWS-IM respectivamente. Estos resultaron indicaron una disminución significativa del TPC respecto a los extractos, pero mayor que en M1. Su capacidad reductora osciló entre 0,14 y 0,19 mmol Trolox/100 g de muestra, y fue menor que en lo extractos previos a la digestión, pero mayor a la encontrada en la etapa de absorción intestinal. En esta etapa no fue detectada actividad antirradicalaria.

Luego de la fermentación colónica el contenido de polifenoles en la fracción bioaccesible (dializable, M3) fue significativamente menor que en los extractos (entre 0,84 y 2,46 mg GAE/100 g de muestra), pero mayor que en la absorción intestinal (M1) lo que indicaría que la microbiota intestinal pudo haber ejercido un efecto positivo en la biodisponibilidad de los compuestos

fenólicos. Esto es factible atribuirlo a que, durante la digestión, las fuertes variaciones de pH y la pepsina pueden afectar la integridad de las paredes celulares, facilitando la liberación de compuestos antioxidantes no detectados en las fases iniciales y la hidrólisis de proteínas que dan como resultado péptidos con propiedades antioxidantes (Cian et al., 2015; Niu et al., 2013). Estos compuestos que serán excretados, pueden ser fermentados en el colon por bacterias y una fracción podría ser absorbida (Jakobek, 2015). Ambos digestos de panes en esta etapa (M3) presentaron una capacidad reductora significativamente menor que la encontrada luego de la digestión intestinal (fracción no dializable, M2), pero en ambos casos cabe destacar que fueron valores muy bajos. Respecto a la actividad antirradicalaria, luego de la fermentación colónica (fracción bioaccesible, M3), esta fue significativamente menor que en todas las etapas anteriores (entre 1,23 y 1,76 mg Te/100 g muestra), a excepción de la fracción no absorbida luego de la digestión intestinal donde no fue detectada.

La discrepancia encontrada entre los valores de FRAP y ABTS se puede atribuir a diferentes mecanismos evaluados por ambos ensayos (Uranga et al., 2016). La capacidad reductora mostró una correlación alta y positiva con TPC, a través de la digestión ($r= 0,80$; $p<0,0001$), sin embargo, la actividad antirradicalaria no evidenció correlación con el TPC ($r= 0,31$; $p= 0,21$). Una tendencia similar fue reportada por Podio et al. (2019) al trabajar con pasta de harina de trigo integral con relación al comportamiento del TPC y la capacidad reductora a través de la digestión *in vitro*. Sin embargo, los autores sí corroboraron correlación de TPC con la actividad antirradicalaria.

6.3.4.2 Evaluación del contenido de minerales en harinas y panes

Los minerales que se encuentran predominantemente en el grano de sorgo son el K seguido del P y el Mg (Arendt y Zannini, 2013; Taylor y Kruger, 2018). También están presentes microelementos reconocidos por su impacto en el estado nutricional como Cu, Fe, Mn y Zn. Sin embargo, el perfil elemental difiere principalmente según la variedad estudiada, el lugar y las condiciones de crecimiento del cultivo (Paiva et al., 2017; Pontieri et al., 2017; Zhao y Ambrose, 2017).

En este trabajo, se realizó la determinación del contenido de Cu, Fe, Mn y Zn, considerados minerales nutricionalmente relevantes, tanto en panes como en harinas, pre y post digestión *in vitro*.

En el proceso de digestión los elementos solo fueron cuantificados en la fracción absorbida en el intestino delgado (dializable, M1), no en las subsiguientes etapas (fracción no dializable y post fermentación colónica), debido a que la mayor parte de los minerales se absorben en el intestino delgado (Kiela y Ghishan, 2016).

El contenido de Cu, Fe, Mn y Zn en los extractos de harinas integrales se muestran en la Tabla 6.8. En general en las harinas integrales el contenido de los minerales fue mayor, aunque las diferencias solo fueron significativas para Fe y Zn. Los valores de Mn y Zn se encontraron de acuerdo con los evaluados en estudios previos del grupo (Curti et al., 2021), aunque los de Cu fueron menores. El contenido de Fe fue menor al reportado por Gerrano et al. (2016) pero similar al informado por de Morais Cardoso et al. (2017) para harina de sorgo integral.

En general el contenido de todos los minerales en panes fue menor que en sus respectivas harinas. Esto pudo estar relacionado con el proceso de panificación, pero también con la formulación de los panes ya que la proporción de harina correspondió al 80% del total de ingredientes. Los panes integrales presentaron una concentración significativamente mayor de todos los elementos que los elaborados con harina parcialmente refinada

Tabla 6.8. Contenido de minerales en harinas y panes.

Muestra		Cu ($\mu\text{g}, \text{g}^{-1}$)				Fe ($\mu\text{g}, \text{g}^{-1}$)				Mn ($\mu\text{g}, \text{g}^{-1}$)				Zn ($\mu\text{g}, \text{g}^{-1}$)							
Harinas	WWS-IM	1,45	\pm	0,02	a	C	12,44	\pm	0,26	b	C	16,80	\pm	0,95	a	B	11,63	\pm	0,55	b	C
	PWS-IM	0,97	\pm	0,13	a	AB	7,43	\pm	0,01	a	B	14,29	\pm	1,36	a	B	4,85	\pm	0,79	a	A
Panes	WWS-IM	1,08	\pm	0,03	b	B	7,58	\pm	0,28	b	B	10,33	\pm	0,20	b	A	9,53	\pm	0,10	b	B
	PWS-IM	0,70	\pm	0,04	a	A	4,72	\pm	0,15	a	A	8,96	\pm	0,20	a	A	4,36	\pm	0,22	a	A

Los valores se expresan como medias ($n = 2$) \pm su desviación estándar. Letras minúsculas distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre harinas o panes. Letras mayúsculas distintas en la misma columna indican diferencias significativas entre todas las muestras (harinas y panes) ($p < 0,05$). WWS-IM: sorgo blanco integral; PWS-IM: sorgo blanco pulido; IM: molienda de impacto.

Teniendo en cuenta que la ingesta de carbohidratos para una persona adulta debe cubrir entre el 45% y 60% de las calorías totales (aprox. 220 g), en función de una dieta de 2000 Kcal. diarias, la porción correspondiente a productos panificados sugerida es alrededor de los 120 g (dos bollos pequeños de pan), y el resto debería completarse con carbohidratos provenientes de otras fuentes vegetales y lácteos, según las guías alimentarias para la población argentina (GAPA, 2016). Considerando la dosis diaria recomendada (DDR) para una persona adulta, para cada mineral (mg) analizado (Cu: 0,9; Fe: 8; Mn: 2,3 y Zn: 11), estimamos el % DDR cubierto por una porción de pan de sorgo de harina integral y refinada. Los resultados se muestran en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9. Porcentaje de la dosis diaria recomendada (DDR) de minerales cubierta por una porción de pan de sorgo.

Muestra	Cu (%)	Fe (%)	Mn (%)	Zn (%)
WWS-IM*	14,42 ± 1,24 ^b	11,37 ± 0,95 ^b	53,88 ± 1,01 ^b	10,40 ± 2,14 ^b
PWS-IM*	9,35 ± 0,65 ^a	7,08 ± 0,33 ^a	46,75 ± 0,52 ^a	4,75 ± 1,17 ^a

*En base a una porción de 120 g de pan para una dieta de 2000 Kcal/día. Los valores se expresan como medias ($n = 2$) ± su desviación estándar. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$). WWS-IM: pan elaborado con harina de sorgo blanco integral; PWS-IM: Pan elaborado con harina de sorgo blanco pulido. IM: molienda por impacto.

El pan de harina integral cubrió porcentajes significativamente mayores de la DDR de todos los minerales respecto al pan elaborado con PWS-IM como se esperaba, considerando el contenido más alto de minerales informado. En promedio una porción de panes obtenidos con WWS-IM y PWS-IM, cubrirían el 14,42% y 9,35% para Cu, el 11,7% y 7,08% para Fe, el 53,88% y 46,75% para Mn y el 10,44% y 4,75% para Zn, respectivamente (Tabla 6.9). Dentro de los minerales analizados, es interesante destacar el aporte de Fe y Zn, ya que especialmente el pan integral cubriría aproximadamente el 10% de la necesidad diaria, con solo una porción. Estos elementos son considerados esenciales en la nutrición y sus deficiencias presentan las principales amenazas para la salud pública en todo el mundo. Entre las situaciones de desnutrición de micronutrientes que afligen a la población humana, las deficiencias de Fe y Zn son de gran preocupación no sólo por las graves consecuencias para la salud que puedan tener, sino también por la cantidad de personas afectadas, especialmente en países con inseguridad alimentaria (Mohammed et al., 2011). Respecto al Mn, observamos un aporte cercano al 50% de la DDR, por parte de ambos panes (Tabla 6.9), siendo mayor para el elaborado con WWS-IM.

La calidad nutricional de los panes, en cuanto a la posibilidad de proveer minerales potencialmente absorbibles durante la digestión intestinal, se determinó mediante el estudio de la dializabilidad (%). Para ello se sometió a los panes a una digestión *in vitro*.

La calidad nutricional del sorgo está dictada principalmente por su composición química y la presencia de factores antinutricionales, como fitatos. Estos son la principal forma de almacenamiento del fosfato, ubicuamente distribuido en plantas, particularmente en cereales y legumbres. Los efectos nutricionales de los fitatos en humanos y animales están relacionados con la interacción del ácido fítico con las proteínas, vitaminas y varios minerales, y por lo tanto restringen su biodisponibilidad (Elkhalil et al., 2001).

Tabla 6.10. Dializabilidad (%) de minerales en panes durante el proceso de digestión *in vitro*.

Muestra	Cu (%)	Fe (%)	Mn (g)	Zn (g)
WWS-IM	22,25 ± 1,63 ^a (0,24)	26,50 ± 0,65 ^a (7,58)	ND	1,85 ± 0,44 ^a (0,18)
PWS-IM	29,95 ± 2,03 ^b (0,22)	29,53 ± 5,81 ^a (4,72)	1,12 ± 0,31 (0,10)	2,33 ± 0,09 ^a (0,10)

Los valores se expresan como medias (n=3) ± desviación estándar. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (p<0,05). WWS: pan de harina de sorgo blanco integral; PWS: Pan de harina de sorgo blanco pulido. IM: molienda de impacto. Valores entre paréntesis indican la concentración en µg/g de los minerales dializados. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (p<0,05)

Los minerales que presentaron mayores dializabilidad fueron Cu y Fe. A su vez para ambos minerales la dializabilidad fue mayor en los extractos de panes elaborados de PWS-IM que en los obtenidos de WWS-IM, aunque las diferencias solo fueron significativas para Cu (Tabla 6.10). La biodisponibilidad de la fracción del hierro no hemo proveniente de vegetales y legumbres, varía generalmente entre 5 al 12%, valores inferiores a los encontrados en este estudio, y depende especialmente de la reducción de hierro férrico (Fe³⁺) a ferroso (Fe²⁺) que ocurre por la acción del ácido gástrico y de las reductasas férricas en la luz intestinal (Ferruzzi et al., 2020).

En el caso de Mn si bien anteriormente mencionamos un aporte significativo a la DDR, según su contenido en panes, en este ensayo no fue detectado en la muestra correspondiente a pan elaborado con WWS-IM pero sí para el producido con PWS-IM, aunque un porcentaje muy bajo (1,12%). Esto indicaría una dificultad en la absorción durante la digestión intestinal. El manganeso

es un oligoelemento implicado en la protección celular frente a los radicales libres, en la formación de glicosaminoglicanos y la síntesis de colesterol (Pauline et al., 2020), por lo que resulta relevante alcanzar los requerimientos diarios sugeridos.

Para Zn el comportamiento fue similar que para Fe y si bien se observó un aumento de la diazabilidad en la muestra PWS-IM, las diferencias no fueron significativas. Estos resultados están de acuerdo con diferentes autores que encontraron la misma tendencia en diversos productos elaborados con harina blanca e integral de trigo (Eagling et al., 2014; Wolters et al., 1993), tortillas (Kloots et al., 2004), y pan elaborado con harina integral de quinoa (Iglesias-Puig et al., 2015). Esto podría deberse a la composición específica de los panes en términos de la cantidad y calidad de las proteínas, la presencia de compuestos como fibras, polifenoles y fitatos, que pueden inhibir la bioaccesibilidad de los minerales, así como la forma química de los elementos y las interacciones con los nutrientes (Vitali et al., 2008).

Este hallazgo sugiere que, aunque los panes de harina de sorgo integral presentaron mayor contenido de minerales después de la digestión *in vitro*, la dializabilidad de los minerales, en promedio, fue menor que para panes elaborados con PWS-IM. Afify et al. (2011), reportaron una biodisponibilidad mayor para Zn, pero menor para Fe en harina sorgo blanco integral sin ningún tratamiento (7,05% y 9,07% respectivamente) e indicaron que el remojado y germinado de los granos mejoraron significativamente los porcentajes, alcanzando el Fe valores similares al informado en este estudio. Cabe destacar que estos autores solo realizaron las determinaciones en harina y no en un producto final. No se encontró en bibliografía otros estudios con panes de sorgos sometidos a digestibilidad *in vitro* para realizar una comparación más adecuada.

6.4 CONCLUSIONES

Los resultados demostraron que las diferentes moliendas utilizadas para obtener harina de sorgo influyeron significativamente en las características de los panes elaborados. La harina parcialmente refinada molida por impacto evidenció la mayor fuerza de extrusión en los batidos, lo que indicó diferencias en sus propiedades de absorción de agua respecto a las otras harinas. El pan elaborado con esta harina presentó la miga más blanda, el menor número de alveolos en la miga, pero de mayor tamaño y el único que no evidenció un colapso de su estructura.

La evaluación del contenido de compuestos polifenólicos y su actividad antioxidante evidenció que los panes elaborados con harina integral obtuvieron el mayor valor para ambas determinaciones. Los compuestos antioxidantes identificados pertenecieron a las familias de poliaminas, ácidos fenólicos y flavonoides. Además, se corroboró que estos estuvieron presentes en harinas y panes. Respecto a la evaluación del contenido de minerales nutricionalmente relevantes, la harina de sorgo integral obtuvo los mayores valores de Cu, Fe, Mn y Zn. Se observó la misma tendencia para el pan elaborado con esta harina, aunque el contenido de todos los minerales en panes fue menor que en sus respectivas harinas.

El ensayo de digestión *in vitro* de los panes permitió evaluar el comportamiento de los compuestos antioxidantes y minerales durante este proceso. Los polifenoles totales disminuyeron significativamente en todas las muestras durante la digestión, aunque el pan elaborado con harina integral mantuvo valores significativamente superiores, respecto a las otras harinas. Durante la etapa de la fermentación colónica el contenido de polifenoles totales fue mayor, que luego de la digestión intestinal. Esto podría deberse a una mayor dializabilidad de los compuestos al no estar unidos a proteínas por efecto de la digestión previa, o también la microbiota intestinal pudo haber ejercido un efecto positivo en la bioaccesibilidad de los compuestos. A su vez la actividad antirradicalaria aumentó significativamente en la etapa de digestión intestinal, respecto a los extractos de panes, lo que puede estar relacionado con un proceso de depolimerización o liberación desde la matriz de los compuestos fenólicos, que condujo a una mayor capacidad antioxidante.

La evaluación de los minerales potencialmente absorbidos reveló que una porción de pan elaborado con harina integral permitiría cubrir un mayor porcentaje de la DDR de todos los minerales analizados, llegando a un 50% para el requerimiento de Mn. Sin embargo, al analizar la

dizabilidad de los minerales, esta fue mayor en los provenientes de harina parcialmente refinada, especialmente Fe y Zn, lo que sugiere que una mayor presencia de salvado pudo influir en su absorción.

7

CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

La búsqueda de nuevas alternativas alimentarias representa un área importante de investigación a nivel nacional e internacional. En este sentido, existen numerosas investigaciones dirigidas a la revalorización de cultivos ancestrales, como el amaranto, la quínoa, la chía, que poseen excelentes propiedades nutritivas; sin embargo, otros cultivos regionales convencionales (subutilizados en la alimentación humana) como el sorgo, han recibido menor atención con este propósito. El sorgo posee muy buenas características agronómicas, puede desarrollarse exitosamente ante un amplio rango de condiciones, tanto edáficas como ambientales, permitiendo una amplia distribución geográfica. A su vez, este cereal resulta esencial en un sistema de rotaciones para mantener la productividad y estabilidad estructural del suelo.

La producción de harina de sorgo en forma estable y con propiedades funcionales óptimas representa una oportunidad para contribuir al aprovechamiento de recursos naturales subexplotados para el desarrollo de alimentos. Además, la ausencia de gluten del grano es una ventaja nutricional que permite una alternativa para la elaboración de productos utilizados en dietas libres de este componente. En este sentido, la obtención y caracterización de diferentes fracciones de harina de sorgo potencia la posibilidad de otorgar valor agregado a este cereal.

El proceso de pulido seguido de molienda por impacto y la molienda con rodillos son comúnmente empleados en la industria, pero no se encuentra mayor información sobre su utilización en la obtención de harinas de sorgo. Este trabajo enfatiza el estudio de las diferentes alternativas para el acondicionamiento y molienda del grano, valora las propiedades fisicoquímicas

y tecnológicas de las harinas, y evalúa su utilización en diferentes productos panificados. Consideramos que los resultados representan un importante aporte para la industria de las harinas obtenidas de cereales menores como el sorgo. La información obtenida resulta relevante en la definición de las condiciones de molienda, con el fin de obtener las harinas con las características apropiadas según su uso final.

La harina es el producto más habitual elaborado a partir de cereales y tiene una gran versatilidad para la elaboración de productos. Sin embargo, para un uso óptimo es imprescindible comprender sus características en detalle. Además, debe cumplir con ciertos parámetros fisicoquímicos. Actualmente, esto se consigue, en parte, eliminando parcialmente las capas externas del grano. También es necesario que cumpla con los parámetros microbiológicos solicitados en la reglamentación vigente a fin de que no represente ningún riesgo para la salud.

Los principales resultados de este trabajo mostraron que el acondicionamiento de los granos influyó el rendimiento y el contenido de cenizas de las harinas obtenidas por molienda de impacto y de rodillo, en las tres variedades de sorgo. En ambas moliendas se obtuvieron mayores rendimientos con condiciones de humedad bajas o medias. Sin embargo, para molienda por impacto el parámetro más influyente fue el aumento del tiempo de pulido, que disminuyó el rendimiento y el contenido de cenizas de las harinas. Este, al igual que un mayor contenido de humedad, condujo a la obtención de harinas progresivamente más claras y con perfiles de viscosidad más elevados. El acondicionamiento a humedad media para los dos tipos de molienda, y el pulido por 180 s de los granos destinados a molienda de impacto, fueron las condiciones seleccionadas, como más adecuadas para continuar con los ensayos. Esto se decidió en función de las propiedades tecnológicas y fisicoquímicas analizadas y teniendo en consideración el mayor rendimiento de molienda, cuidando de no exceder el contenido límite de cenizas establecido por el CAA.

La evaluación de la vida útil de las harinas reveló un aumento de la acidez total entre el inicio y el final del ensayo en todas las harinas, especialmente para la harina de sorgo blanco integral. La determinación de los compuestos de oxidación primaria a través del índice de peróxidos mostró que todas las muestras cumplieron con lo establecido por el CAA para harina durante todo el tiempo evaluado. En el ensayo de oxidación acelerada, la harina de sorgo marrón integral fue la

menos afectada, probablemente debido a su mayor contenido de antioxidantes que favorecieron la estabilidad fisicoquímica.

La incorporación de las harinas previamente caracterizadas en productos horneados permitió evaluar sus diferentes aptitudes en función del tipo de producto. La elaboración de bizcochuelos se vio favorecida por la utilización de harinas con menor tamaño de partículas, mientras que para galletitas los mejores resultados fueron obtenidos con mezclas con harina de arroz. Respecto a los panes, aquellos elaborados con harina de mayor tamaño de partículas generaron alveolos más grandes y estables en la miga, que permitieron sostener la estructura formada. Los panes formulados con harina de sorgo blanco parcialmente refinada (molida por impacto) presentaron las mejores características tecnológicas, mientras que los panes integrales fueron valorados positivamente según su contenido de compuestos antioxidante y minerales, aunque la accesibilidad *in vitro* de estos últimos se vio comprometida probablemente por la mayor presencia de salvado.

En general todos los productos elaborados con harinas de sorgo blanco presentaron superior aceptación sensorial. Esto indica que para la utilización de sorgos coloreados es necesario readecuar los procesos pre-molienda para conseguir una separación más eficiente del salvado, que, si bien contiene gran cantidad de compuestos antioxidantes, condiciona la palatabilidad y sabor de los productos, especialmente por su astringencia.

Los desarrollos logrados en el marco del presente trabajo permitieron alcanzar un conocimiento profundo sobre las condiciones de procesamiento del grano de sorgo y las características de las harinas. Esto favorece la valorización del sorgo que se cultiva ampliamente en nuestro país, pero se encuentra subutilizado. Además, se formularon productos horneados con propiedades distintivas según las harinas utilizadas, para la nutrición humana. Esto contribuye a mejorar las condiciones de comercialización de la harina de sorgo y a aumentar la variedad de alimentos libres de gluten disponibles en el mercado.

En base a los resultados conseguidos se propone continuar el estudio de las harinas de sorgo para potenciar su utilización en la industria alimenticia. Dentro de las perspectivas futuras, se plantea la aplicación de tratamientos térmicos de granos y su posterior pulido y molienda. Las tecnologías de lecho fluidizado y el calentamiento infrarrojo permitirían incrementar el período de

conservación y modificar las propiedades fisicoquímicas de las harinas de forma eficiente, con el fin de facilitar su incorporación en la formulación de distintos tipos de alimentos.

8 DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

Parte de los resultados obtenidos en este trabajo de Tesis Doctoral dieron lugar a las siguientes publicaciones y presentaciones en reuniones científicas.

8.1.1 Publicaciones de artículos en revistas internacionales con referato

Curti, M. I., Belorio, M., Palavecino, P. M., Camiña, J. M., Ribotta, P. D., & Gómez, M. (2022). Effect of sorghum flour properties on gluten-free sponge cake. *Journal of Food Science and Technology*, 59(4), 1407-1418. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05150-0>

Curti, M. I., Palavecino, P. M., Camiña, J. M., Savio, M., & Ribotta, P. D. (2022). Effect of tempering conditions and mill type on physicochemical and functional properties of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), 1-11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16851>

Curti, M. I., Cora Jofre, F., Azcarate, S. M., Camiña, J. M., Ribotta, P. D., & Savio, M. (2021). Greening ultrasound-assisted extraction for Sorghum flour multielemental determination by microwave-induced plasma optical emission spectrometry. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9201094>

8.1.2 Trabajos presentados en eventos Científico-Tecnológicos

Curti M.I., Belorio M, Savio M, Camiña JM, Ribotta PD. Caracterización de panes libres de gluten elaborados con harinas de sorgo obtenidas por molienda seca. *VIII Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Córdoba. 2022

Curti M.I., Belorio M, Quiroga F, Savio M, Camiña JM, Gómez M, Ribotta PD. Evaluación de la calidad y aceptabilidad de galletitas sin gluten producidas con harinas de sorgo y arroz. *I Encuentro Intersectorial sobre Innovación y Calidad en la Alimentación*. UNLA, Bs As. 2021.

Curti M.I., Palavecino P, Quiroga F, Savio M, Camiña JM, Gómez M, Ribotta PD. Influencia del contenido de humedad y los procesos de pulido y molienda en las características de las harinas de sorgo obtenidas. *3er Congreso Iberoamericano de Ingeniería de los Alimentos*. Montevideo (Uruguay). 2020.

Curti M.I., Belorio M, Quiroga F, Savio M, Camiña JM, Gómez M, Ribotta PD. Influencia de la molienda de granos de sorgo en las características de las harinas para elaboración de bizcochuelos libres de gluten. *XXI Congreso de la Asociación Latinoamericana y del Caribe de Ciencia y Tecnología de Alimentos (ALACCTA)*. Bs As. 2019.

Curti M.I., Cora Jofré F, Savio M, Azcarate S, Ribotta PD, Camiña JM. Método rápido para la cuantificación del contenido proteico en harina de sorgo y mezclas con harina de arroz mediante espectroscopía NIRS de reflectancia difusa. *10º Congreso Argentino de Química Analítica*. Santa Rosa (La Pampa). 2019.

Curti M.I., Cora Jofre F, Zaldarriaga Heredia J, Azcarate S, Camiña JM, Ribotta PD, Savio M. Preparación de muestra con ultrasonido para el análisis multielemental de granos de sorgo por MPAES. *V Congreso Uruguayo de Química Analítica*. Montevideo (Uruguay). 2018.

Curti M.I., Quiroga F, Savio M, Penci MC, Camiña JM, Ribotta PD. Efecto del contenido de humedad de granos de sorgo en los procesos de pulido y molienda para la obtención de harinas. *VII Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Córdoba. 2018.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AACC. (2010). *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*, (11th ed.).
- Abdelghafor, R. F., Mustafa, A. I., Ibrahim, A. M. H., & Krishnan, P. G. (2011). Quality of bread from composite flour of sorghum and hard white winter wheat. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 3(1), 9-15.
- Aboubacar, A., Yazici, N., & Hamaker, B. R. (2006). Extent of decortication and quality of flour, couscous and porridge made from different sorghum cultivars. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(6), 698-703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01138.x>
- Adebowale, O. J., Taylor, J. R. N., & de Kock, H. L. (2020). Stabilization of wholegrain sorghum flour and consequent potential improvement of food product sensory quality by microwave treatment of the kernels. *Lwt*, 132(July). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109827>
- Adiamo, O. Q., Fawale, O. S., & Olawoye, B. (2018). Recent trends in the formulation of gluten-free sorghum products. *Journal of Culinary Science and Technology*, 16(4), 311-325. <https://doi.org/10.1080/15428052.2017.1388896>
- Afify, A. E. M. M. R., El-Beltagi, H. S., El-Salam, S. M. A., & Omran, A. A. (2011). Bioavailability of iron, zinc, phytate and phytase activity during soaking and germination of white sorghum varieties. En *PLoS ONE* (Vol. 6, Número 10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025512>
- Aguilar, E. G., Albarracín, G. de J., Uñates, M. A., Piola, H. D., Camiña, J. M., & Escudero, N. L. (2015). Evaluation of the Nutritional Quality of the Grain Protein of New Amaranths Varieties. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70(1), 21-26. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0456-3>
- Ait Ameer, L., Odile, MathieuLalanne, Lalanne, V., Trystram, G., & Birlouez-Aragón, I. (2007). Food chemistry comparison of the effects of sucrose and hexose on furfural formation and browning in cookies baked at different temperatures. *Food Chemistry*, 101, 1407-1416. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.03.049>
- Al-Rabadi, G. (2013). Influence of hammer mill screen size on processing parameters and starch enrichment in milled sorghum. *Cereal Research Communications*, 41(3), 493-499. <https://doi.org/10.1556/CRC.2013.0016>
- Al-Rabadi, G. J. S., Gilbert, R. G., & Gidley, M. J. (2009). Effect of particle size on kinetics of starch digestion in milled barley and sorghum grains by porcine alpha-amylase. *Journal of Cereal Science*, 50(2), 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.05.001>

- Al-Rabadi, G. J., Torley, P. J., Williams, B. A., Bryden, W. L., & Gidley, M. J. (2012). Particle size heterogeneity in milled barley and sorghum grains: Effects on physico-chemical properties and starch digestibility. *Journal of Cereal Science*, *56*(2), 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.04.009>
- Angioloni, A., & Collar, C. (2009). Bread crumb quality assessment: A plural physical approach. *European Food Research and Technology*, *229*(1), 21-30. <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1022-3>
- Angioloni, A., & Collar, C. (2013). Suitability of oat, millet and sorghum in breadmaking. *Food and Bioprocess Technology*, *6*(6), 1486-1493. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0786-9>
- AOCS. 2009. *Methods and Recommended Practices of the AOCS* (EE UU). American Oil Chemist's Society.
- Arendt, E., & Zannini, E. (2013). 8 Sorghum. *Cereal Grains for the Food and Beverage Industries*. <https://doi.org/10.1533/9780857098924.283>
- Awika, J. M., McDonough, C. M., & Rooney, L. W. (2005). Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(16), 6230-6234. <https://doi.org/10.1021/jf0510384>
- Awika, J. M., & Rooney, L. W. (2004). Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry*, *65*(9), 1199-1221. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.04.001>
- Awika, J. M., Rooney, L. W., & Waniska, R. D. (2005). Anthocyanins from black sorghum and their antioxidant properties. *Food Chemistry*, *90*(1-2), 293-301. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.058>
- Barberis, N., & Sánchez, C. (2013). Informe de cultivo de sorgo: evolución y perspectivas. Un análisis de las estadísticas, julio 2013. *Economía*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1652-1>
- Barbosa-Cánovas, G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., & Hong, Y. (2005). *Food Powder*. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0>
- Barichello, V., Yada, R. Y., Coffin, R. H., & Stanley, D. W. (1990). Low Temperature Sweetening in Susceptible and Resistant Potatoes: Starch Structure and Composition. *Journal of Food Science*, *55*(4), 1054-1059. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01596.x>
- Barrera, G. N., Bustos, M. C., Iturriaga, L., Flores, S. K., León, A. E., & Ribotta, P. D. (2013). Effect of damaged starch on the rheological properties of wheat starch suspensions. *Journal of Food Engineering*, *116*(1), 233-239. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.020>
- Barrera, G. N., Pérez, G. T., Ribotta, P. D., & León, A. E. (2007). Influence of damaged starch on cookie and bread-making quality. *European Food Research and Technology*, *225*(1), 1-7. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0374-1>
- Barros, F., Dykes, L., Awika, J. M., & Rooney, L. W. (2013). Accelerated solvent extraction of phenolic compounds from sorghum brans. *Journal of Cereal Science*, *58*(2), 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.05.011>
- Bassinello, P. Z., Freitas, D. de G. C., Ascheri, J. L. R., Takeiti, C. Y., Carvalho, R. N., Koakuzu, S. N., & Carvalho, A. V. (2011). Characterization of cookies formulated with rice and black bean extruded flours. *Procedia Food Science*, *1*, 1645-1652. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.243>
- Baumgartner, B., Özkaya, B., Saka, I., & Özkaya, H. (2018). Functional and physical properties of cookies enriched with dephytinized oat bran. *Journal of Cereal Science*, *80*, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.011>
- Belorio, M., Moralejo, C., & Gómez, M. (2021). Assessing the influence of psyllium as a fat substitute in

- wheat and gluten-free cookies. *Food Science and Technology International*, 27(8), 693-701. <https://doi.org/10.1177/1082013220981332>
- Belorio, M., Sahagún, M., & Gómez, M. (2019). Influence of flour particle size distribution on the quality of maize gluten-free cookies. *Foods*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/foods8020083>
- Belton, P. S., & Taylor, J. R. N. (2002). Pseudocereals and less common cereals. En *Pseudocereals and Less Common Cereals*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09544-7>
- Benmoussa, M., Suhendra, B., Aboubacar, A., & Hamaker, B. R. (2006). Distinctive sorghum starch granule morphologies appear to improve raw starch digestibility. *Starch/Staerke*, 58(2), 92-99. <https://doi.org/10.1002/star.200400344>
- Berghofer, L. K., Hocking, A. D., Miskelly, D., & Jansson, E. (2003). Microbiology of wheat and flour milling in Australia. *International Journal of Food Microbiology*, 85(1-2), 137-149. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00507-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00507-X)
- Bernardi, L. (2019). Perfil del sorgo. *Agricultura, Ganadería y Pesca*, 1-11.
- Beta, T., & Corke, H. (2001). Noodle quality as related to sorghum starch properties. *Cereal Chemistry Journal*, 78(4), 417-420. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2001.78.4.417>
- Birck, N. M. M., Lorini, I., & Scussel, V. M. (2006). Fungus and mycotoxins in wheat grain at post harvest. *9th International Working Conference on Stored Product Protection*, 198-205.
- Bize, M., Smith, B. M., Aramouni, F. M., & Bean, S. R. (2017). The effects of egg and diacetyl tartaric acid esters of monoglycerides addition on storage stability, texture, and sensory properties of gluten-free sorghum bread. *Journal of Food Science*, 82(1), 194-201. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13574>
- Blanco Canalis, M. S., Baroni, M. V., León, A. E., & Ribotta, P. D. (2020). Effect of peach puree incorporation on cookie quality and on simulated digestion of polyphenols and antioxidant properties. *Food Chemistry*, 333(March), 127464. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127464>
- Blanco Canalis, M. S., León, A. E., & Ribotta, P. D. (2019). Incorporation of dietary fiber on the cookie dough. Effects on thermal properties and water availability. *Food Chemistry*, 271, 309-317. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.146>
- Bröhan, M., Jerkovic, V., & Collin, S. (2011). Potentiality of red sorghum for producing stilbenoid-enriched beers with high antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 4088-4094. <https://doi.org/10.1021/jf1047755>
- Buitimea-Cantúa, N. E., Torres-Chávez, P. I., Ledesma-Osuna, A. I., Ramírez-Wong, B., Robles-Sánchez, R. M., & Serna-Saldívar, S. O. (2013). Effect of defatting and decortication on distribution of fatty acids, phenolic and antioxidant compounds in sorghum (*Sorghum bicolor*) bran fractions. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(10), 2166-2175. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12201>
- Bustos, M. C., Vignola, M. B., Paesani, C., & León, A. E. (2020). Berry fruits-enriched pasta: effect of processing and *in vitro* digestion on phenolics and its antioxidant activity, bioaccessibility and potential bioavailability. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 2104-2112. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14453>
- Caivano, J. L., & Buera, M. del P. (2012). *Color in Food* (Taylor & Francis (eds.)). S.l.: CRC Press.
- Campbell, L., Raikos, V., & Euston, S. R. (2003). Modification of functional properties of egg-white proteins. *Nahrung - Food*, 47(6), 369-376. <https://doi.org/10.1002/food.200390084>
- Capriles, V. D., & Arêas, J. A. G. (2013). Effects of prebiotic inulin-type fructans on structure, quality,

- sensory acceptance and glycemic response of gluten-free breads. *Food and Function*, 4(1), 104-110. <https://doi.org/10.1039/c2fo10283h>
- Cardoso, L. D. M., Pinheiro, S. S., Da Silva, L. L., De Menezes, C. B., De Carvalho, C. W. P., Tardin, F. D., Queiroz, V. A. V., Martino, H. S. D., & Pinheiro-Sant'Ana, H. M. (2015). Tocochromanols and carotenoids in sorghum (*Sorghum bicolor* L.): Diversity and stability to the heat treatment. *Food Chemistry*, 172, 900-908. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.117>
- Carrasco, N., Zamora, M., Melin, A., Bolletta, A., Marinissen, J., Gigón, R., Forján, H., Lagrange, S., Campos, P., Manso, L., & Cicchino, M. (2011). Manual de sorgo. En *Proyecto Regional Desarrollo de una Agricultura Sustentable en los Territorios del CERBAS*. <https://doi.org/10.1093/nar/gkp897>
- Carson, L., Setser, C., & Sun, X. S. (2000). Sensory characteristics of sorghum composite bread. *International Journal of Food Science and Technology*, 35(5), 465-471. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2000.00399.x>
- Cayres, C. A., Ramírez Ascheri, J. L., Peixoto Gimenes Couto, M. A., Almeida, E. L., & Melo, L. (2020). Consumers' acceptance of optimized gluten-free sorghum-based cakes and their drivers of liking and disliking. *Journal of Cereal Science*, 93(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102938>
- Cervini, M., Frustace, A., Garrido, G. D., Rocchetti, G., & Giuberti, G. (2021). Nutritional, physical and sensory characteristics of gluten-free biscuits incorporated with a novel resistant starch ingredient. *Heliyon*, 7(3), e06562. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06562>
- Chang, M.-H. (2006). Baking. En *Bakery Products* (pp. 273-284). Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470277553.ch15>
- Chauhan, A., Saxena, D. C., & Singh, S. (2015). Total dietary fibre and antioxidant activity of gluten free cookies made from raw and germinated amaranth (*Amaranthus* spp.) flour. *Lwt*, 63(2), 939-945. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.115>
- Chen, J. J., Lü, C. Y., & Lu, S. (2003). Physicochemical and morphological analyses on damaged rice starches. *Journal of Food and Drug Analysis*, 11(4), 283-289. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2684>
- Chiremba, C., Rooney, L. W., & Beta, T. (2012). Microwave-assisted extraction of bound phenolic acids in bran and flour fractions from sorghum and maize cultivars varying in hardness. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(18), 4735-4742. <https://doi.org/10.1021/jf300279t>
- Chiremba, C., Taylor, J. R. N., & Duodu, K. G. (2009). Phenolic content, antioxidant activity, and consumer acceptability of sorghum cookies. *Cereal Chemistry*, 86(5), 590-594. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-86-5-0590>
- Choi, H.-W., & Baik, B.-K. (2013). Significance of wheat flour particle size on sponge cake baking quality. *Cereal Chemistry Journal*, 90(2), 150-156. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-07-12-0088-R>
- Chong, J., Poutaraud, A., & Hugueney, P. (2009). Metabolism and roles of stilbenes in plants. *Plant Science*, 177(3), 143-155. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.05.012>
- Chung, H. J., Cho, A., & Lim, S. T. (2014). Utilization of germinated and heat-moisture treated brown rices in sugar-snap cookies. *LWT - Food Science and Technology*, 57(1), 260-266. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.01.018>
- Cian, R. E., Vioque, J., & Drago, S. R. (2015). Structure-mechanism relationship of antioxidant and ACE I inhibitory peptides from wheat gluten hydrolysate fractionated by pH. *Food Research International*, 69, 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.12.036>
- Collar, C. (2018). Gluten-Free Dough-Based Foods and Technologies. En *Sorghum and Millets*. AACCI. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811527-5.00011-3>

- Colombo, J. M. (2021). Sorgho: un cultivo histórico que comenzó a recuperar lugar en el agro argentino. *Telam Digital*, 1-5.
- Conforti, F. D. (2014). Cake manufacture. En Y. H. Hui, H. Corke, D. L. I, W. Nip, & N. A. Cross (Eds.), *Bakery products: Science and technology* (2nd ed., pp. 565–584). Wiley-Blackwell.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., & Tang, M. C. (2009). Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*, 23(6), 1527-1534. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.09.016>
- Coulson, J. M., & Richards, J. F. (2019). Particle Size Reduction and Enlargement. En R. P. Chhabra & B. Gurappa (Eds.), *Coulson and Richardson's Chemical Engineering* (6th Editio, pp. 205-280). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101098-3.00006-8>
- Curti, M. I., Cora Jofre, F., Azcarate, S. M., Camiña, J. M., Ribotta, P. D., & Savio, M. (2021). Greening ultrasound-assisted extraction for sorghum flour multielemental determination by microwave-induced plasma optical emission spectrometry. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9201094>
- Curti, M. I., Palavecino, P. M., Camiña, J. M., Savio, M., & Ribotta, P. D. (2022). Effect of tempering conditions and mill type on physicochemical and functional properties of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), 1-11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16851>
- Cyclotec 1093 brochure. (2012). *Gama de molinos* (p. 10). <https://www.fossanalytics.com>
- Da Silva Fonte Boa, G., Da Silva, B. P., De Souza Dantas, M. I., Duarte, F. L. M., Martino, H. S. D., & Binoti, M. L. (2021). Sorghum, germinated millet and chia cookies: development, chemical composition and sensory analysis. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*, 71(3), 218-227. <https://doi.org/10.37527/2021.71.3.006>
- Dapčević Hadnadev, T. R., Torbica, A. M., & Hadnadev, M. S. (2013). Influence of Buckwheat Flour and Carboxymethyl Cellulose on Rheological Behaviour and Baking Performance of Gluten-Free Cookie Dough. *Food and Bioprocess Technology*, 6(7), 1770-1781. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0841-6>
- Dayakar Rao, B., Anis, M., Kalpana, K., Sunooj, K. V., Patil, J. V., & Ganesh, T. (2016). Influence of milling methods and particle size on hydration properties of sorghum flour and quality of sorghum biscuits. *LWT - Food Science and Technology*, 67, 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.033>
- de la Hera, E., Martinez, M., Oliete, B., & Gómez, M. (2013). Influence of Flour Particle Size on Quality of Gluten-Free Rice Cakes. *Food and Bioprocess Technology*, 6(9), 2280-2288. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0922-6>
- de La Hera, E., Rosell, C. M., & Gomez, M. (2014). Effect of water content and flour particle size on gluten-free bread quality and digestibility. *Food Chemistry*, 151, 526-531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.115>
- de Moraes Cardoso, L., Pinheiro, S. S., Martino, H. S. D., & Pinheiro-Sant'Ana, H. M. (2017). Sorghum (*Sorghum bicolor* L.): Nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(2), 372-390. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.887057>
- de Oliveira, K. G., Queiroz, V. A. V., Carlos, L. de A., Cardoso, L. de M., Pinheiro-Sant'Ana, H. M., Anunciação, P. C., de Menezes, C. B., Silva, E. C. da, & Barros, F. (2017). Effect of the storage time and temperature on phenolic compounds of sorghum grain and flour. *Food Chemistry*, 216, 390-398. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.047>
- Delcour, J. A., & Hosney, R. C. (2010). *Principles of cereal science and technology* (3 ed). AACC International.

- Delwiche, S. R. (2000). Wheat endosperm compressive strength properties as affected by moisture. *American Society of Agricultural Engineers*, 43(2), 365-373.
- Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., & Sahin, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, 96(2), 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.004>
- Dey, S. K., Dey, S., & Das, A. (2013). Comminution features in an impact hammer mill. *Powder Technology*, 235, 914-920. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.003>
- Dhen, N., Román, L., Ben Rejeb, I., Martínez, M. M., Garogouri, M., & Gómez, M. (2016). Particle size distribution of soy flour affecting the quality of enriched gluten-free cakes. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.032>
- Dhital, S., Shrestha, A. K., Flanagan, B. M., Hasjim, J., & Gidley, M. J. (2011). Cryo-milling of starch granules leads to differential effects on molecular size and conformation. *Carbohydrate Polymers*, 84(3), 1133-1140. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.01.002>
- Di Cairano, M., Galgano, F., Tolve, R., Caruso, M. C., & Condelli, N. (2018). Focus on gluten free biscuits: Ingredients and issues. *Trends in Food Science and Technology*, 81(March), 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.006>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., & Gonzalez, L. (2015). InfoStat versión 2015. *FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*.
- Dickinson, E. (2010). Food emulsions and foams: Stabilization by particles. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 15(1-2), 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.11.001>
- Dicko, M. H., Gruppen, H., Traoré, A. S., Voragen, A. G. J., & Van Berkel, W. J. H. (2006). Sorghum grain as human food in Africa: Relevance of content of starch and amylase activities. *African Journal of Biotechnology*, 5(5), 384-395. <https://doi.org/10.4314/ajb.v5i5>
- Doblado-Maldonado, A. F., Pike, O. A., Sweley, J. C., & Rose, D. J. (2012). Key issues and challenges in whole wheat flour milling and storage. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.02.015>
- Duodu, K. G. (2019). *Chapter 7 Assaying Sorghum Nutritional Quality* (Vol. 1931).
- Duta, D. E., & Culetu, A. (2015). Evaluation of rheological, physicochemical, thermal, mechanical and sensory properties of oat-based gluten free cookies. *Journal of Food Engineering*, 162, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.04.002>
- Dykes, L., Peterson, G. C., Rooney, W. L., & Rooney, L. W. (2011). Flavonoid composition of lemon-yellow sorghum genotypes. *Food Chemistry*, 128(1), 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.020>
- Dykes, L., & Rooney, L. W. (2006). Sorghum and millet phenols and antioxidants. *Journal of Cereal Science*, 44(3), 236-251. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.007>
- Dykes, L., Seitz, L. M., Rooney, W. L., & Rooney, L. W. (2009). Flavonoid composition of red sorghum genotypes. *Food Chemistry*, 116(1), 313-317. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.052>
- Eagling, T., Neal, A. L., Mcgrath, S. P., Fairweather-tait, S., Shewry, P. R., & Zhao, F. (2014). *Distribution and Speciation of Iron and Zinc in Grain of Two Wheat Genotypes*.
- Eglezos. (2010). Erratum: Microbiological quality of wheat grain and flour from two mills in Queensland, Australia. *Journal of Food Protection*, 73(11), 1962. <https://doi.org/https://doi.org/10.4315/0362-028X->

73.8.1533

- Elisia, I., Young, J. W., Yuan, Y. V., & Kitts, D. D. (2013). Association between tocopherol isoform composition and lipid oxidation in selected multiple edible oils. *Food Research International*, 52(2), 508-514. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.013>
- Elkhalil, E. A. I., Tinay, A. H. El, Mohamed, B. E., & Elsheikh, E. A. E. (2001). Effect of malt pretreatment on phytic acid and *in vitro* protein. *Food Chemistry*, 72, 30-33. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00195-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00195-3)
- Etcheverry, P., Grusak, M. A., & Fleige, L. E. (2012). Application of *in vitro* bioaccessibility and bioavailability methods for calcium, carotenoids, folate, iron, magnesium, polyphenols, zinc, and vitamins B 6, B 12, D, and E. *Frontiers in Physiology*, 3 AUG(August), 1-22. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00317>
- FAO. (2018). *World Food and Agriculture – Statistical Pocketbook 2018*.
- Feizollahi, E., Mirmahdi, R. S., Zoghi, A., Zijlstra, R. T., Roopesh, M. S., & Vasanthan, T. (2021). Review of the beneficial and anti-nutritional qualities of phytic acid, and procedures for removing it from food products. *Food Research International*, 143(March), 110284. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110284>
- Feng, P. (2001). Bacteriological Analytical Manual. *FDA/Center for Food Safety and Applied Nutrition*, 1-8.
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., da Silva, E. G. P., Portugal, L. A., dos Reis, P. S., Souza, A. S., & dos Santos, W. N. L. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, 597(2), 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>
- Ferruzzi, M. G., Kruger, J., Mohamedshah, Z., Debelo, H., & Taylor, J. R. N. (2020). Insights from *in vitro* exploration of factors influencing iron, zinc and provitamin A carotenoid bioaccessibility and intestinal absorption from cereals. *Journal of Cereal Science*, 96, 103126. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103126>
- Fierens, E., Helsmoortel, L., Joye, I. J., Courtin, C. M., & Delcour, J. A. (2015). Changes in wheat (*Triticum aestivum* L.) flour pasting characteristics as a result of storage and their underlying mechanisms. *Journal of Cereal Science*, 65, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.06.009>
- Frankel, E. N. (2005). *Lipid oxidation* (second ed.). Woodhead Publishing Limited.
- Gaines, C. S., & Windham, W. R. (1998). Effect of wheat moisture content on meal apparent particle size and hardness scores determined by near-infrared reflectance spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 75(3), 386-391. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.3.386>
- Galán, M. G., Llopart, E. E., & Drago, S. R. (2018). Losses of nutrients and anti-nutrients in red and white sorghum cultivars after decorticating in optimised conditions. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 69(3), 283-290. <https://doi.org/10.1080/09637486.2017.1353956>
- Galliard, T. (1986). Hydrolytic and oxidative degradation of lipids during storage of wholemeal flour: Effects of bran and germ components. *Journal of Cereal Science*, 4(2), 179-192. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(86\)80020-0](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(86)80020-0)
- Galvez, F. C., & Resurrección, A. V. A. (1992). Reliability of the focus group technique in determining the quality characteristics of mungbean [*Vigna Radiata* (L.) Wilczec] Noodles. *Journal of Sensory Studies*, 7(4), 315-326. <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.1992.tb00197.x>
- Gambuś, H., Gambuś, F., Pastuszka, D., Wrona, P., Ziobro, R., Sabat, R., Mickowska, B., Nowotna, A., & Sikora, M. (2009). Quality of gluten-free supplemented cakes and biscuits. *International Journal of Food*

- Sciences and Nutrition*, 60(SUPPL.4), 31-50. <https://doi.org/10.1080/09637480802375523>
- Gan, Z., Ellis, P. R., Vaughan, J. G., & Galliard, T. (1989). Some effects of non-endosperm components of wheat and of added gluten on wholemeal bread microstructure. *Journal of Cereal Science*, 10(2), 81-91. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(89\)80037-2](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(89)80037-2)
- Gan, Z., Galliard, T., Ellis, P. R., Angold, R. E., & Vaughan, J. G. (1992). Effect of the outer bran layers on the loaf volume of wheat bread. *Journal of Cereal Science*, 15(2), 151-163. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(09\)80066-0](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(09)80066-0)
- GAPA. (2016). Guías alimentarias para la población Argentina. *Ministerio de Salud de la Nación*, 1-252. www.msal.gov.ar
- Garzón, A. G., Erben, M., Osella, C. A., & Drago, S. R. (2020). Effects of baking on γ -aminobutyric acid and free phenolic acids from gluten-free cookies made with native and malted whole sorghum flours. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(8), 1-10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14571>
- George, J., & McCracken, K. J. (2003). Changes in *in vitro* viscosity (IVV) of whole or ground wheat grain during storage and effects of storage temperature. *Journal of Cereal Science*, 37(2), 179-185. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0492>
- Gerrano, A. S., Labuschagne, M. T., van Biljon, A., & Shargie, N. G. (2016). Quantification of Mineral Composition and Total Protein Content in Sorghum [*Sorghum Bicolor* (L.) Moench] Genotypes. *Cereal Research Communications*, 44(2), 272-285. <https://doi.org/10.1556/0806.43.2015.046>
- Gibson, R. S., Bailey, K. B., Gibbs, M., & Ferguson, E. L. (2010). A review of phytate, iron, zinc, and calcium concentrations in plant-based complementary foods used in low-income countries and implications for bioavailability. *Food and Nutrition Bulletin*, 31(2 SUPPL.), 134-146. <https://doi.org/10.1177/15648265100312s206>
- Gili, R. D., Palavecino, P. M., Penci, M. C., Martinez, M. L., & Ribotta, P. D. (2017). Wheat germ stabilization by infrared radiation. *Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 71-81. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2437-z>
- Gili, R. D., Torrez Irigoyen, R. M., Penci, M. C., Giner, S. A., & Ribotta, P. D. (2017). Physical characterization and fluidization design parameters of wheat germ. *Journal of Food Engineering*, 212, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.011>
- Girard, A. L., & Awika, J. M. (2018). Sorghum polyphenols and other bioactive components as functional and health promoting food ingredients. *Journal of Cereal Science*, 84(September), 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.10.009>
- Giuberti, G., Marti, A., Fortunati, P., & Gallo, A. (2017). Gluten free rice cookies with resistant starch ingredients from modified waxy rice starches: Nutritional aspects and textural characteristics. *Journal of Cereal Science*, 76, 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.06.008>
- Giuberti, G., Rocchetti, G., Sigolo, S., Fortunati, P., Lucini, L., & Gallo, A. (2018). Exploitation of alfalfa seed (*Medicago sativa* L.) flour into gluten-free rice cookies: Nutritional, antioxidant and quality characteristics. *Food Chemistry*, 239, 679-687. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.004>
- Godefroidt, T., Ooms, N., Pareyt, B., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2019). Ingredient functionality during foam-type cake making: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(5), 1550-1562. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12488>
- Gómez-Galera, S., Rojas, E., Sudhakar, D., Zhu, C., Pelacho, A. M., Capell, T., & Christou, P. (2010). Critical evaluation of strategies for mineral fortification of staple food crops. *Transgenic Research*, 19(2), 165-

180. <https://doi.org/10.1007/s11248-009-9311-y>
- Gómez, M., Ronda, F., Caballero, P. A., Blanco, C. A., & Rosell, C. M. (2007). Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf-life of yellow layer cakes. *Food Hydrocolloids*, 21(2), 167-173. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.03.012>
- Gómez, M., Ruiz-París, E., & Oliete, B. (2010). Influence of flour mill streams on cake quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(9), 1794-1800. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02338.x>
- Gujral, N., Freeman, H. J., & Thomson, A. B. R. (2012). *Celiac disease: Prevalence, diagnosis, pathogenesis and treatment*. 18(42), 6036-6059. <https://doi.org/10.3748/wjg.v18.i42.6036>
- Hager, A. S., Taylor, J. P., Waters, D. M., & Arendt, E. K. (2014). Gluten free beer - A review. *Trends in Food Science and Technology*, 36(1), 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.01.001>
- Hall, J., & Guyton, A. (2011). *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (12 th ed.). Saunders/Elsevier.
- Han, H. M., Cho, J. H., Kang, H. W., & Koh, B. K. (2012). Rice varieties in relation to rice bread quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(7), 1462-1467. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4727>
- Handa, A. K., Fatima, T., & Mattoo, A. K. (2018). Polyamines: bio-molecules with diverse functions in plant and human health and disease. *Frontiers in Chemistry*, 6(February), 1-18. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00010>
- Hansen, L., & Rose, M. S. (1996). Sensory acceptability is inversely related to development of fat rancidity in bread made from stored flour. *Journal of the American Dietetic Association*, 96(8), 792-793. [https://doi.org/10.1016/S0002-8223\(96\)00218-0](https://doi.org/10.1016/S0002-8223(96)00218-0)
- Hasjım, J., Li, E., & Dhital, S. (2013). Milling of rice grains: Effects of starch/flour structures on gelatinization and pasting properties. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 682-690. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.09.023>
- Heiniö, R. L., Noort, M. W. J., Katina, K., Alam, S. A., Sozer, N., de Kock, H. L., Hersleth, M., & Poutanen, K. (2016). Sensory characteristics of wholegrain and bran-rich cereal foods - A review. *Trends in Food Science and Technology*, 47, 25-38. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.002>
- Hemery, Y. M., Lailou, A., Fontan, L., Jallier, V., Moench-Pfanner, R., Berger, J., & Avallone, S. (2018). Storage conditions and packaging greatly affects the stability of fortified wheat flour: Influence on vitamin A, iron, zinc, and oxidation. *Food Chemistry*, 240, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.084>
- Hernández Sánchez, M. del R., Cuvelier, M. E., & Turchiuli, C. (2016). Effect of α -tocopherol on oxidative stability of oil during spray drying and storage of dried emulsions. *Food Research International*, 88, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.035>
- Hook, S. C. W., Bone, G. T., & Fearn, T. (1982). The conditioning of wheat. The effect of increasing wheat moisture content on the milling performance of uk wheats with reference to wheat texture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 33(7), 655-662. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740330711>
- Hoseney, R. C. (1994). *Principles of cereal science and technology* (second edi). American Association of Cereal Chemists.
- Hoseney, R. C., & Rogers, D. E. (1994). Mechanism of sugar functionality in cookies. En *The Science of Cookie and Cracker Production*, (pp. 203-225.).
- Hrusková, M., & Machová, D. (2018). Changes of wheat flour properties during short term storage. *Czech*

- Journal of Food Sciences*, 20(No. 4), 125-130. <https://doi.org/10.17221/3522-cjfs>
- Hu, W. X., Chen, J., Zhao, J. W., Chen, L., & Wang, Y. H. (2020). Effect of the addition of modified starch on gelatinization and gelation properties of rice flour. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.002>
- Huang, Z. Q., Xie, X. ling, Chen, Y., Lu, J. ping, & Tong, Z. F. (2008). Ball-milling treatment effect on physicochemical properties and features for cassava and maize starches. *Comptes Rendus Chimie*, 11(1-2), 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2007.04.008>
- Hunter, T. N., Pugh, R. J., Franks, G. V., & Jameson, G. J. (2008). The role of particles in stabilising foams and emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 137(2), 57-81. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.07.007>
- Iglesias-Puig, E., Monedero, V., & Haros, M. (2015). Bread with whole quinoa flour and bifidobacterial phytases increases dietary mineral intake and bioavailability. *LWT - Food Science and Technology*, 60(1), 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.045>
- Inglett, G. E., Chen, D., & Liu, S. X. (2015). Physical properties of gluten-free sugar cookies made from amaranth-oat composites. *Lwt*, 63(1), 214-220. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.056>
- Jakobek, L. (2015). Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins. *Food Chemistry*, 175, 556-567. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.013>
- Joshi, P., & Brimelow, C. (2002). Colour measurement of food by colour reflectance. En M. D. Woodhead & P. Limited (Eds.), *Colour in food* (pp. 16-74).
- Kamal-Eldin, A. (2006). Effect of fatty acids and tocopherols on the oxidative stability of vegetable oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 108(12), 1051-1061. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200600090>
- Kamath, V. G., Chandrashekar, A., & Rajini, P. S. (2004). Antiradical properties of sorghum (Sorghum bicolor L. Moench) flour extracts. *Journal of Cereal Science*, 40(3), 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.08.004>
- Kang, J., Price, W. E., Ashton, J., Tapsell, L. C., & Johnson, S. (2016). Identification and characterization of phenolic compounds in hydromethanolic extracts of sorghum wholegrains by LC-ESI-MSn. *Food Chemistry*, 211, 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.052>
- Kang, S., & Delwiche, S. R. (1999). Moisture diffusion modeling of wheat kernels during soaking. *American Society of Agricultural Engineers*, 42(5), 1359-1365.
- Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R., & Karim, A. A. (2012). Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*, 26(2), 398-404. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.016>
- Kiela, P. R., & Ghishan, F. K. (2016). Physiology of intestinal absorption and secretion. *Best Practice and Research: Clinical Gastroenterology*, 30(2), 145-159. <https://doi.org/10.1016/j.bpg.2016.02.007>
- Kim, C. S., & Walker, C. E. (1992). Changes in Starch Pasting Properties Due to Sugars and Emulsifiers as Determined by Viscosity Measurement. *Journal of Food Science*, 57(4), 1009-1013. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb14344.x>
- Kim, J. M., & Shin, M. (2014). Effects of particle size distributions of rice flour on the quality of gluten-free rice cupcakes. *LWT - Food Science and Technology*, 59(1), 526-532. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.042>
- Kirylyuk, J., Kawka, A., Gasiorowski, H., Chalcarz, A., & Aniola, J. (2000). Milling of barley to obtain β -

- glucan enriched products. *Nahrung/Food*, 44(4), 238-241. [https://doi.org/10.1002/1521-3803\(20000701\)44:4<238::AID-FOOD238>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20000701)44:4<238::AID-FOOD238>3.0.CO;2-I)
- Kloots, W., Op Den Kamp, D., & Abrahamse, L. (2004). *In vitro* iron availability from iron-fortified whole-grain wheat flour. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(26), 8132-8136. <https://doi.org/10.1021/jf040010+>
- Kruger, J., Taylor, J. R. N., Du, X., De Moura, F. F., Lönnerdal, B., & Oelofse, A. (2013). Effect of phytate reduction of sorghum, through genetic modification, on iron and zinc availability as assessed by an *in vitro* dialysability bioaccessibility assay, Caco-2 cell uptake assay, and suckling rat pup absorption model. *Food Chemistry*, 141(2), 1019-1025. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.105>
- Kulamarva, A. G., Sosle, V. R., & Raghavan, G. S. V. (2009). Nutritional and rheological properties of sorghum. *International Journal of Food Properties*, 12(1), 55-69. <https://doi.org/10.1080/10942910802252148>
- Kumari, P. K., Umakanth, A. V., Narsaiah, T. B., & Uma, A. (2021). Exploring anthocyanins, antioxidant capacity and α -glucosidase inhibition in bran and flour extracts of selected sorghum genotypes. *Food Bioscience*, 41(March), 100979. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100979>
- Kweon, M., Martin, R., & Souza, E. (2009). Effect of tempering conditions on milling performance and flour functionality. *Cereal Chemistry Journal*, 86(1), 12-17. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-86-1-0012>
- Kweon, M., Slade, L., Levine, H., Martin, R., & Souza, E. (2009). Exploration of sugar functionality in sugar-snap and wire-cut cookie baking: implications for potential sucrose replacement or reduction. *Cereal Chemistry Journal*, 86(4), 425-433. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-86-4-0425>
- Kweon, M., Slade, L., Levine, H., & Souza, E. (2010). Application of RVA and Time-Lapse photography to explore effects of extent of chlorination, milling extraction rate, and particle-size reduction of flour on cake-baking functionality. *Cereal Chemistry*, 87(5), 409-414. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-03-10-0046>
- Lagrain, B., Wilderjans, E., Glorieux, C., & Delcour, J. A. (2012). Importance of Gluten and Starch for Structural and Textural Properties of Crumb from Fresh and Stored Bread. *Food Biophysics*, 7(2), 173-181. <https://doi.org/10.1007/s11483-012-9255-2>
- Laguette, M., Lecomte, J., & Villeneuve, P. (2007). Evaluation of the ability of antioxidants to counteract lipid oxidation: Existing methods, new trends and challenges. *Progress in Lipid Research*, 46(5), 244-282. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2007.05.002>
- Lam, S., Velikov, K. P., & Velev, O. D. (2014). Pickering stabilization of foams and emulsions with particles of biological origin. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 19(5), 490-500. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.07.003>
- Lampi, A. M., Damerou, A., Li, J., Moisio, T., Partanen, R., Forssell, P., & Piironen, V. (2015). Changes in lipids and volatile compounds of oat flours and extrudates during processing and storage. *Journal of Cereal Science*, 62, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.12.011>
- Langó, B., Fehér, A. G., Bicskei, B. Z., Jaksics, E., Németh, R., Bender, D., D'Amico, S., Schoenlechner, R., & Tömösközi, S. (2018). The Effect of Different Laboratory-scale Sample Preparation Methods on the Composition of Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) and Millet (*Panicum miliaceum* L.) Milling Fractions. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(4), 426-431. <https://doi.org/10.3311/PPch.12846>
- Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., & Biliaderis, C. G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*,

- 79(3), 1033-1047. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.032>
- Lazaridou, A., Vouris, D. G., Zoumpoulakis, P., & Biliaderis, C. G. (2018). Physicochemical properties of jet milled wheat flours and doughs. *Food Hydrocolloids*, 80, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.044>
- Lee, S., & Inglett, G. E. (2006). Rheological and physical evaluation of jet-cooked oat bran in low calorie cookies. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(5), 553-559. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01105.x>
- León, A. E., Barrera, G. N., Pérez, G. T., Ribotta, P. D., & Rosell, C. M. (2006). Effect of damaged starch levels on flour-thermal behaviour and bread staling. *European Food Research and Technology*, 224(2), 187-192. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0297-x>
- León, A. E., & Rosell, C. M. (2007). *De tales harinas, tales panes* (H. Báez (ed.); Primera ed).
- Liang, X., King, J. M., & Shih, F. F. (2002). Pasting property differences of commercial and isolated rice starch with added lipids and β -cyclodextrin. *Cereal Chemistry*, 79(6), 812-818. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.6.812>
- Liu, C., Liu, L., Li, L., Hao, C., Zheng, X., Bian, K., Zhang, J., & Wang, X. (2015). Effects of different milling processes on whole wheat flour quality and performance in steamed bread making. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1), 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.08.030>
- Liu, L., Herald, T. J., Wang, D., Wilson, J. D., Bean, S. R., & Aramouni, F. M. (2012). Characterization of sorghum grain and evaluation of sorghum flour in a Chinese egg noodle system. *Journal of Cereal Science*, 55(1), 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.09.007>
- Liu, Z., & Scanlon, M. G. (2003). Predicting mechanical properties of bread crumb. *Food and Bioprocess Technology: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C*, 81(3), 224-238. <https://doi.org/10.1205/096030803322437992>
- Liyana-Pathirana, C. M., & Shahidi, F. (2007). The antioxidant potential of milling fractions from breadwheat and durum. *Journal of Cereal Science*, 45(3), 238-247. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.08.007>
- Lochte-Watson, K. R., Weller, C. L., & Jackson, D. S. (2000). Fractionation of grain sorghum using abrasive decortication. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 77(2), 203-208. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0583>
- Lucini Mas, A., Brigante, F. I., Salvucci, E., Ribotta, P., Martinez, M. L., Wunderlin, D. A., & Baroni, M. V. (2022). Novel cookie formulation with defatted sesame flour: Evaluation of its technological and sensory properties. Changes in phenolic profile, antioxidant activity, and gut microbiota after simulated gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*, 389(December 2021), 133122. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133122>
- Maache-Rezzoug, Z., Bouvier, J. M., Allaf, K., & Patras, C. (1998). Effect of Principal Ingredients on Rheological Behaviour of Biscuit Dough and on Quality of Biscuits. *Journal of Food Engineering*, 35(1), 23-42. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00017-X)
- Machado Alencar, N. M., Steel, C. J., Alvim, I. D., de Morais, E. C., & Andre Bolini, H. M. (2015). Addition of quinoa and amaranth flour in gluten-free breads: Temporal profile and instrumental analysis. *LWT - Food Science and Technology*, 62(2), 1011-1018. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.02.029>
- Maestri, D. M., Labuckas, D. O., Lamarque, A. L., Zygadlo, J. A., Grosso, N. R., Martínez, M. J., & Guzmán, C. A. (1996). Proximate composition and seed lipid components of sorghum cultivars from Argentina.

- Journal of the Science of Food and Agriculture*, 70(3), 334-336. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199603\)70:3<334::AID-JSFA500>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199603)70:3<334::AID-JSFA500>3.0.CO;2-I)
- Mahmoud, R. M., Yousif, E. I., Gadallah, M. G. E., & Alawneh, A. R. (2013). Formulations and quality characterization of gluten-free Egyptian balady flat bread. *Annals of Agricultural Sciences*, 58(1), 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2013.01.004>
- Majzoobi, M., Poor, Z. V., Jamalian, J., & Farahnaky, A. (2016). Improvement of the quality of gluten-free sponge cake using different levels and particle sizes of carrot pomace powder. *International Journal of Food Science and Technology*, 51(6), 1369-1377. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13104>
- Manca, M. C., Farias, M. E., & Aredes Fernández, P. A. (2006). Interacciones microbianas. En U. de Guadalajara (Ed.), *Microbiología de los alimentos*.
- Mancebo, C. M., Martínez, M. M., Merino, C., de la Hera, E., & Gómez, M. (2017). Effect of oil and shortening in rice bread quality: Relationship between dough rheology and quality characteristics. *Journal of Texture Studies*, 48(6), 597-606. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12270>
- Mancebo, C. M., Picón, J., & Gómez, M. (2015). Effect of flour properties on the quality characteristics of gluten free sugar-snap cookies. *LWT - Food Science and Technology*, 64(1), 264-269. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.057>
- Mancebo, C. M., Rodríguez, P., Martínez, M. M., & Gómez, M. (2018). Effect of the addition of soluble (nutriose, inulin and polydextrose) and insoluble (bamboo, potato and pea) fibres on the quality of sugar-snap cookies. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 129-136. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13566>
- Manley, D. (2000). *Technology of Biscuits, Crackers and Cookies*. (D. Manley (ed.)). Woodhead Publishing Limited.
- Marco, C., & Rosell, C. M. (2008). Breadmaking performance of protein enriched, gluten-free breads. *European Food Research and Technology*, 227(4), 1205-1213. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0838-6>
- Mariotti, M., Pagani, M. A., & Lucisano, M. (2013). The role of buckwheat and HPMC on the breadmaking properties of some commercial gluten-free bread mixtures. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 393-400. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.07.005>
- Martino, H. S. D., Tomaz, P. A., Aguiar Moraes, É., da Conceição, L. L., Oliveira, D. da S., Queiroz, V. A. V., Rodrigues, J. A. S., Pirozi, M. R., Pinheiro-Sant'Ana, H. M., & Ribeiro, S. M. R. (2012). Chemical characterization and size distribution of sorghum genotypes for human consumption. *Artigo Original/Original Article Rev Inst Adolfo Lutz*, 71(2), 337-344.
- McDonough, C. M., Floyd, C. D., Waniska, R. D., & Rooney, L. W. (2004). Effect of accelerated aging on maize, sorghum, and sorghum meal. *Journal of Cereal Science*, 39(3), 351-361. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.01.001>
- Meera, M. S., Bhashyam, M. K., & Ali, S. Z. (2011). Effect of heat treatment of sorghum grains on storage stability of flour. *LWT - Food Science and Technology*, 44(10), 2199-2204. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.05.020>
- Metrohm. (2012). *Manual* 743 *Rancimat*. https://www.metrohm.com/es_ar/products/8/7438/87438003.html
- Milani, P., Torres-Aguilar, P., Hamaker, B., Manary, M., Abushamma, S., Laar, A., Steiner, R., Ehsani, M., de la Parra, J., Skaven-Ruben, D., de Kock, H., Hawkes, C., Covic, N., Mitchell, C., & Taylor, J. (2022). The whole grain manifesto: from green revolution to grain evolution. *Global Food Security*, 34(April),

100649. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100649>
- Miller, R. A., & Hosney, R. C. (1997). Factors in hard wheat flour responsible for reduced cookie spread. *Cereal Chemistry*, 74(3), 330-336. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1997.74.3.330>
- Mir, S. A., Shah, M. A., Naik, H. R., & Zargar, I. A. (2016). Influence of hydrocolloids on dough handling and technological properties of gluten-free breads. *Trends in Food Science and Technology*, 51, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.005>
- Miranda-garcia, O. (2013). The Storage of Grain and Aging of Flour, and Their Effects on Flour Functionality. En *Thesis*. Oregon State University.
- Mohammed, M. A. E., Makki, H. M. M., & Mustafa, A. E. M. I. (2011). Production of cereal-based infant food from sorghum [*Sorghum bicolor* (L) Moench] and pigeon pea (*Cajanus cajan*). *Pakistan Journal of Nutrition*, 10(10), 910-913. <https://doi.org/10.3923/pjn.2011.910.913>
- Moiraghi, M., de la Hera, E., Pérez, G. T., & Gómez, M. (2013). Effect of wheat flour characteristics on sponge cake quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(3), 542-549. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5821>
- Molinari, R., Costantini, L., Timperio, A. M., Lelli, V., Bonafaccia, F., Bonafaccia, G., & Merendino, N. (2018). Tartary buckwheat malt as ingredient of gluten-free cookies. *Journal of Cereal Science*, 80, 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.11.011>
- Moore, M. M., Heinbockel, M., Dockery, P., Ulmer, H. M., & Arendt, E. K. (2006). Network formation in gluten-free bread with application of transglutaminase. *Cereal Chemistry*, 83(1), 28-36. <https://doi.org/10.1094/CC-83-0028>
- Moore, M. M., Juga, B., Schober, T. J., & Arendt, E. K. (2007). Effect of lactic acid bacteria on properties of gluten-free sourdoughs, batters, and quality and ultrastructure of gluten-free bread. *Cereal Chemistry*, 84(4), 357-364. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-84-4-0357>
- Moore, M. M., Schober, T. J., Dockery, P., & Arendt, E. K. (2004). Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs, batters, and breads. *Cereal Chemistry*, 81(5), 567-575. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.5.567>
- Mousia, Z., Edherly, S., Pandiella, S. S., & Webb, C. (2004). Effect of wheat pearling on flour quality. *Food Research International*, 37(5), 449-459. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.02.012>
- Mtelisi Dube, N., Xu, F., & Zhao, R. (2020). The efficacy of sorghum flour addition on dough rheological properties and bread quality: A short review. *Grain and Oil Science and Technology*, 3(4), 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2020.08.001>
- Muñoz-Esparza, N. C., Latorre-Moratalla, M. L., Comas-Basté, O., Toro-Funes, N., Veciana-Nogués, M. T., & Vidal-Carou, M. C. (2019). Polyamines in food. *Frontiers in Nutrition*, 6(July), 1-11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00108>
- Naczek, M., & Shahidi, F. (2004). Extraction and analysis of phenolics in food. *Journal of Chromatography A*, 1054(1-2), 95-111. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.08.059>
- Naqash, F., Gani, A., Gani, A., & Masoodi, F. A. (2017). Gluten-free baking: Combating the challenges - A review. *Trends in Food Science and Technology*, 66, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.004>
- Naseer, B., Naik, H. R., Hussain, S. Z., Zargar, I., Beenish, Bhat, T. A., & Nazir, N. (2021). Effect of carboxymethyl cellulose and baking conditions on in-vitro starch digestibility and physico-textural characteristics of low glycemic index gluten-free rice cookies. *Lwt*, 141(October 2020), 110885. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110885>

- Nasir, M., Butt, M. S., Faqir M, A., Sharif, K., & Minhas, R. (2003). Effect of Moisture on the Shelf Life of Wheat Flour. *International Journal of Agriculture and Biology*, 5(4), 458-459.
- Nielsen, M. M., & Hansen, Å. (2008). Rapid high-performance liquid chromatography determination of tocopherols and tocotrienols in cereals. *Cereal Chemistry*, 85(2), 248-251. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-85-2-0248>
- Niu, L. Y., Jiang, S. T., & Pan, L. J. (2013). Preparation and evaluation of antioxidant activities of peptides obtained from defatted wheat germ by fermentation. *Journal of Food Science and Technology*, 50(1), 53-61. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0318-z>
- Oforu, F. K., Elahi, F., Daliri, E. B. M., Tyagi, A., Chen, X. Q., Chelliah, R., Kim, J. H., Han, S. I., & Oh, D. H. (2021). UHPLC-ESI-QTOF-MS/MS characterization, antioxidant and antidiabetic properties of sorghum grains. *Food Chemistry*, 337(August 2020), 127788. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127788>
- Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G., & Lindhauer, M. G. (2011). Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch. *LWT - Food Science and Technology*, 44(3), 681-686. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.09.006>
- Onyango, C., Unbehend, G., & Lindhauer, M. G. (2009). Effect of cellulose-derivatives and emulsifiers on creep-recovery and crumb properties of gluten-free bread prepared from sorghum and gelatinised cassava starch. *Food Research International*, 42(8), 949-955. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.04.011>
- Oomah, B. ., Reichert, R. D., & Youngs, C. G. (1981). A novel, multi-sample, tangential abrasive dehulling device (TADD). *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 14(3), 170. [https://doi.org/10.1016/s0315-5463\(81\)72811-6](https://doi.org/10.1016/s0315-5463(81)72811-6)
- Paesani, C., Bravo-Núñez, Á., & Gómez, M. (2020a). Effect of extrusion of whole-grain maize flour on the characteristics of gluten-free cookies. *Lwt*, 132(June). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109931>
- Paesani, C., Bravo-Núñez, Á., & Gómez, M. (2020b). Effect of extrusion of whole-grain maize flour on the characteristics of gluten-free cookies. *Lwt*, 132(March). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109931>
- Paiva, C. L., Queiroz, V. A. V., Simeone, M. L. F., Schaffert, R. E., de Oliveira, A. C., & da Silva, C. S. (2017). Mineral content of sorghum genotypes and the influence of water stress. *Food Chemistry*, 214, 400-405. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.067>
- Palavecino, P. M., Penci, M. C., Calderón-Domínguez, G., & Ribotta, P. D. (2016). Chemical composition and physical properties of sorghum flour prepared from different sorghum hybrids grown in Argentina. *Starch - Stärke*, 68(11-12), 1055-1064. <https://doi.org/10.1002/star.201600111>
- Palavecino, P. M., Penci, M. C., & Ribotta, P. D. (2019a). Effect of planetary ball milling on physicochemical and morphological properties of sorghum flour. *Journal of Food Engineering*, 262(May), 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.007>
- Palavecino, P. M., Penci, M. C., & Ribotta, P. D. (2019b). Impact of chemical modifications in pilot-scale isolated sorghum starch and commercial cassava starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 521-529. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.202>
- Palavecino, P. M., Ribotta, P. D., León, A. E., & Bustos, M. C. (2019c). Gluten-free sorghum pasta: starch digestibility and antioxidant capacity compared with commercial products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1351-1357. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9310>
- Pareyt, B., & Delcour, J. A. (2008). The role of wheat flour constituents, sugar, and fat in low moisture

- cereal based products: A review on sugar-snap cookies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(9), 824-839. <https://doi.org/10.1080/10408390701719223>
- Pauline, M., Roger, P., Sophie Natacha Nina, N. E., Arielle, T., Eugene, E. E., & Robert, N. (2020). Physico-chemical and nutritional characterization of cereals brans enriched breads. *Scientific African*, 7, e00251. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00251>
- Pedersen, J. F., Milton, T., & Mass, R. A. (2000). A twelve-hour *in vitro* procedure for sorghum grain feed quality assessment. *Crop Science*, 40(1), 204-208. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.401204x>
- Penagini, F., Dillillo, D., Meneghin, F., Mameli, C., Fabiano, V., & Zuccotti, G. V. (2013). Gluten-free diet in children: An approach to a nutritionally adequate and balanced diet. *Nutrients*, 5(11), 4553-4565. <https://doi.org/10.3390/nu5114553>
- Pérez-Matute, P., Zulet, M. A., & Martínez, J. A. (2009). Reactive species and diabetes: counteracting oxidative stress to improve health. *Current Opinion in Pharmacology*, 9(6), 771-779. <https://doi.org/10.1016/j.coph.2009.08.005>
- Pérez, A., Saucedo, O., Iglesias, J., Wencomo, H. B., Reyes, F., Oquendo, G., & Milián, I. (2010). Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y Forrajes*, 33(1), 1-25. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942010000100001
- Perry, P. A., & Donald, A. M. (2002). The effect of sugars on the gelatinisation of starch. *Carbohydrate Polymers*, 49, 155-165. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00324-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00324-1)
- Pigni, N. B., Aranibar, C., Lucini Mas, A., Aguirre, A., Borneo, R., Wunderlin, D., & Baroni, M. V. (2020). Chemical profile and bioaccessibility of polyphenols from wheat pasta supplemented with partially-deoiled chia flour. *Lwt*, 124(February), 109134. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109134>
- Pinheiro-Sant'Ana, H. M., Guinazi, M., Oliveira, D. da S., Della Lucia, C. M., Reis, B. de L., & Brandão, S. C. C. (2011). Method for simultaneous analysis of eight vitamin E isomers in various foods by high performance liquid chromatography and fluorescence detection. *Journal of Chromatography A*, 1218(47), 8496-8502. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.09.067>
- Podio, N. S., Baroni, M. V., Pérez, G. T., & Wunderlin, D. A. (2019). Assessment of bioactive compounds and their *in vitro* bioaccessibility in whole-wheat flour pasta. *Food Chemistry*, 293(May), 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.117>
- Pomeranz, Y. (1992). Biochemical, functional, and nutritive changes during storage. En D. B. Sauer (Ed.), *Storage of Cereal Grains and Their Products* (4th Ed.). AACC International: St. Paul, MN.
- Pontieri, P., Pepe, G., Campiglia, P., Merciai, F., Basilicata, M. G., Smolensky, D., Calcagnile, M., Troisi, J., Romano, R., Del Giudice, F., Aletta, M., Guida, M., Alifano, P., & Del Giudice, L. (2021). Comparison of content in phenolic compounds and antioxidant capacity in grains of white, red, and black sorghum varieties grown in the mediterranean area. *ACS Food Science and Technology*, 1(6), 1109-1119. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00115>
- Pontieri, P., Troisi, J., Boffa, A., Del Giudice, F., Chessa, A. L., Pizzolante, G., Romano, R., Alifano, P., & Del Giudice, L. (2017). Nutrient, fatty acid and mineral composition of selected white food-grade sorghum hybrids grown in a Mediterranean area of Southern Italy. *Maydica*, 62(1).
- Prabhakaran, B., & Moses, J. A. (2016). Pasting characteristics of raw rice flour obtained from various mill types. *Advances in Life Sciences*, 5(5), 1605-1609.
- Probst, K. V., & Ileleji, K. E. (2013). The effect of moisture content on the grinding performance of corn and corncobs by hammer milling Reduction of Mycotoxins in distillers grain View project. *Transactions*

- of the ASAE. *American Society of Agricultural Engineers*, 56(January), 1025-1033. <https://www.researchgate.net/publication/259562566>
- Pulido, R., Bravo, L., & Saura-calixto, F. (2000). Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing/antioxidant power assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 3396–3402.
- Rai, S., Kaur, A., & Singh, B. (2014). Quality characteristics of gluten free cookies prepared from different flour combinations. *Journal of Food Science and Technology*, 51(4), 785-789. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0547-1>
- Ram, S., & Singh, R. P. (2004). Solvent retention capacities of indian wheats and their relationship with cookie-making quality. *Cereal Chemistry*, 81(1), 128-133. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.1.128>
- Rao, B. D., Kulkarni, D. B., & Kavitha, C. (2018). Study on evaluation of starch, dietary fiber and mineral composition of cookies developed from 12 sorghum cultivars. *Food Chemistry*, 238, 82-86. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.069>
- Rao, S., Santhakumar, A. B., Chinkwo, K. A., Wu, G., Johnson, S. K., & Blanchard, C. L. (2018a). Characterization of phenolic compounds and antioxidant activity in sorghum grains. *Journal of Cereal Science*, 84(July), 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.07.013>
- Rao, S., Santhakumar, A. B., Chinkwo, K. A., Wu, G., Johnson, S. K., & Blanchard, C. L. (2018b). Characterization of phenolic compounds and antioxidant activity in sorghum grains. *Journal of Cereal Science*, 84(June), 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.07.013>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9-10), 1231-1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- RENALOA. (2014). Microorganismos indicadores. En *Análisis microbiológico de los alimentos. Metodología analítica oficial* (Vol. 3).
- Renzetti, S., & Arendt, E. K. (2009). Effect of protease treatment on the baking quality of brown rice bread: From textural and rheological properties to biochemistry and microstructure. *Journal of Cereal Science*, 50(1), 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.02.002>
- Renzetti, S., Dal Bello, F., & Arendt, E. K. (2008). Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, 48(1), 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.07.011>
- Richardson, G., Langton, M., Fäldt, P., & Hermansson, A. M. (2002). Microstructure of α -crystalline emulsifiers and their influence on air incorporation in cake batter. *Cereal Chemistry*, 79(4), 546-552. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.4.546>
- Rizk, I., Hemat, E., Bedeir, S., Gadallah, M., & Abou-Elazm, A. (2018). Quality characteristics of sponge cake and biscuit prepared using composite flour. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 23(2), 537-547. <https://doi.org/10.21608/ajs.2015.14595>
- Rocha-Parra, A. F., Belorio, M., Ribotta, P. D., Ferrero, C., & Gómez, M. (2018). Effect of the particle size of pear pomace on the quality of enriched layer and sponge cakes. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 1-11. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14078>
- Rodríguez-Sandoval, E., Lascano, A., & Sandoval, G. (2012). Influence of the partial substitution of wheat flour for quinoa and potatoe flour on the thermomechanical and bread making properties of doughs.

- Cient*, 15(1), 199-207. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000300007>
- Ronda, F., Gómez, M., Blanco, C. A., & Caballero, P. A. (2005). Effects of polyols and nondigestible oligosaccharides on the quality of sugar-free sponge cakes. *Food Chemistry*, 90(4), 549-555. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.023>
- Ronda, F., Perez-Quirce, S., Lazaridou, A., & Biliaderis, C. G. (2015). Effect of barley and oat β -glucan concentrates on gluten-free rice-based doughs and bread characteristics. *Food Hydrocolloids*, 48, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.031>
- Ronda, F., & Roos, Y. H. (2011). Staling of fresh and frozen gluten-free bread. *Journal of Cereal Science*, 53(3), 340-346. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.02.004>
- Rooney, L., Prof, R., Fellow, F., & Mcdonough, C. (2002). *Myths About Sorghum Tannins*.
- Rooney, L. W., & Murty, D. S. (1981). International Symposium on Sorghum Grain Quality. En *Icrisat* (pp. 1-430).
- Rosell, C. M., Barro, F., Sousa, C., & Mena, M. C. (2014). Cereals for developing gluten-free products and analytical tools for gluten detection. *Journal of Cereal Science*, 59(3), 354-364. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.10.001>
- Rumler, R., Bender, D., Speranza, S., Frauenlob, J., Gamper, L., Hoek, J., Jäger, H., & Schönlechner, R. (2021). Chemical and physical characterization of sorghum milling fractions and sorghum whole meal flours obtained via stone or roller milling. *Foods*, 10(4), 870. <https://doi.org/10.3390/foods10040870>
- Sabillon, L., Stratton, J., Rose, D. J., Flores, R. A., Bianchini, A., Sabill, L., Stratton, J., Rose, D. J., & Flores, R. A. (2016). Reduction in microbial load of wheat by tempering with organic acid and saline solutions. *Cereal Chemistry*, 93(6), 638-646. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-16-0153-R>
- Sahagún, M., & Gómez, M. (2018). Influence of protein source on characteristics and quality of gluten-free cookies. *Journal of Food Science and Technology*, 55(10), 4131-4138. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3339-z>
- Sakač, M., Pestorić, M., Mandić, A., Mišan, A., Nedeljković, N., Jambrec, D., Jovanov, P., Lazić, V., Pezo, L., & Sedej, I. (2016). Shelf-life prediction of gluten-free rice-buckwheat cookies. *Journal of Cereal Science*, 69, 336-343. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.04.008>
- Sakhare, S. D., Inamdar, A. A., Gaikwad, S. B., D., I., & G., V. R. (2014). Roller milling fractionation of green gram (*Vigna radiata*): optimization of milling conditions and chemical characterization of millstreams. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3854-3861. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0903-9>
- Sakhare, S. D., Inamdar, A. A., & Prabhasankar, P. (2020). Functional properties of roller mill processed fenugreek fractions. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(6), 3103-3111. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00550-w>
- Salman, H., & Copeland, L. (2007). Effect of storage on fat acidity and pasting characteristics of wheat flour. *Cereal Chemistry*, 84(6), 600-606. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-84-6-0600>
- Schober, T. J., Messerschmidt, M., Bean, S. R., Park, S. H., & Arendt, E. K. (2005). Gluten-free bread from sorghum: Quality differences among hybrids. *Cereal Chemistry*, 82(4), 394-404. <https://doi.org/10.1094/CC-82-0394>
- Schober, T. J., O'Brien, C. M., McCarthy, D., Darnedde, A., & Arendt, E. K. (2003). Influence of gluten-free flour mixes and fat powders on the quality of gluten-free biscuits. *European Food Research and Technology*, 216(5), 369-376. <https://doi.org/10.1007/s00217-003-0694-3>

- Schofield, P., Mbugua, D. M., & Pell, A. N. (2001). Analysis of condensed tannins: a review. *Animal Feed Science and Technology*, 91(1), 21-40. *Animal Feed Science and Technology*, 91, 21-40. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00228-0](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00228-0)
- Sciarini, L. S., Ribotta, P. D., León, A. E., & Pérez, G. T. (2010). Effect of hydrocolloids on gluten-free batter properties and bread quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(11), 2306-2312. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02407.x>
- Sciarini, L. S., Ribotta, P. D., León, A. E., & Pérez, G. T. (2012). Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality. *Journal of Food Engineering*, 111(4), 590-597. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.011>
- Sciarini, L. S., Steffolani, M. E., Fernández, A., Paesani, C., & Pérez, G. T. (2020). Gluten-free breadmaking affected by the particle size and chemical composition of quinoa and buckwheat flour fractions. *Food Science and Technology International*, 26(4), 321-332. <https://doi.org/10.1177/1082013219894109>
- Seeram, N. P. (2008). Berry fruits: Compositional elements, biochemical activities, and the impact of their intake on human health, performance, and disease. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(3), 627-629. <https://doi.org/10.1021/jf071988k>
- Serna-Saldivar, S. O. (2010). *Cereal Grains* (G. V. Barbosa-Cánovas (ed.)). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Serna-Saldivar, S., & Rooney, L. (1995). Structure and chemistry of sorghum and millets. En D. Dendy (Ed.), *Sorghum and millets: chemistry and technology* (pp. 69-124). Association of Cereal Chemists.
- Shankar, S. R., & Dayanandan, P. (2020). Structure and histochemistry of sorghum caryopsis in relation to grain-filling. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 12(4), 852-868. <https://doi.org/10.15835/NSB12410714>
- Shannon, J. C., Garwood, D. L., & Boyer, C. D. (2009). Genetics and Physiology of Starch Development. En *Starch* (Third Edit). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-746275-2.00003-3>
- Shao, Y., & Bao, J. (2015). Polyphenols in whole rice grain: Genetic diversity and health benefits. *Food Chemistry*, 180, 86-97. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.027>
- Shen, S., Huang, R., Li, C., Wu, W., Chen, H., Shi, J., Chen, S., & Ye, X. (2018). Phenolic compositions and antioxidant activities differ significantly among sorghum grains with different applications. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 23(5). <https://doi.org/10.3390/molecules23051203>
- Shih, C. H., Siu, S. O., Ng, R., Wong, E., Chiu, L. C. M., Chu, I. K., & Lo, C. (2007). Quantitative analysis of anticancer 3-deoxyanthocyanidins in infected sorghum seedlings. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(2), 254-259. <https://doi.org/10.1021/jf062516t>
- Shin, D. J., Kim, W., & Kim, Y. (2013). Physicochemical and sensory properties of soy bread made with germinated, steamed, and roasted soy flour. *Food Chemistry*, 141(1), 517-523. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.03.005>
- Shull, J., Chandrashekar, A., Kirleis, A., & Ejeta, G. (1990). Development of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) endosperm in varieties of varying hardness. *Food Structure*, 9(3), 253-267.
- SIIA. (2016). *Sistema Integrado de Información Agropecuaria*. <http://www.sia.gov.ar>
- Silva, V. M., Putti, F. F., White, P. J., & Reis, A. R. dos. (2021). Phytic acid accumulation in plants: Biosynthesis pathway regulation and role in human diet. *Plant Physiology and Biochemistry*, 164, 132-146. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.035>

- Song, H. P., Delwiche, S. R., & Line, M. J. (1998). Moisture distribution in a mature soft wheat grain by three-dimensional magnetic resonance imaging. *Journal of Cereal Science*, 27(2), 191-197. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1997.0163>
- Sowbhagya, C. M., & Bhattacharya, K. R. (2001). Changes in pasting behaviour of rice during ageing. *Journal of Cereal Science*, 34(2), 115-124. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2001.0371>
- Sruthi, N. U., & Rao, P. S. (2021). Effect of processing on storage stability of millet flour: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 112(October 2020), 58-74. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.043>
- Stenfors Arnesen, L. P., Fagerlund, A., & Granum, P. E. (2008). From soil to gut: *Bacillus cereus* and its food poisoning toxins. *FEMS Microbiology Reviews*, 32(4), 579-606. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00112.x>
- Storck, C. R., Fortes, C. R., Halal, S. L. M. El, Ribeiro, J. D., Montagner, G. E., Fonseca, L. M., Zavareze, E. da R., & Dias, A. R. G. (2021). Different reaction times for phosphorylation of sorghum flour (*Sorghum bicolor*): Physicochemical evaluation and application in the formulation of gluten-free cakes. *Food Bioscience*, 44(November). <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101441>
- Suhendro, E. L., Kunetz, C. F., McDonough, C. M., Rooney, L. W., & Waniska, R. D. (2000). Cooking Characteristics and Quality of Noodles from Food Sorghum. *Cereal Chemistry Journal*, 77(2), 96-100. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.2.96>
- Sun, Q., Han, Z., Wang, L., & Xiong, L. (2014). Physicochemical differences between sorghum starch and sorghum flour modified by heat-moisture treatment. *Food Chemistry*, 145, 756-764. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.129>
- Svensson, L., Sekwati-Monang, B., Lutz, D. L., Schieber, R., & Gänzle, M. G. (2010). Phenolic acids and flavonoids in nonfermented and fermented red sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(16), 9214-9220. <https://doi.org/10.1021/jf101504v>
- Szczeniak, A. S. (1963). Classification of Textural Characteristics. *Journal of Food Science*, 28(4), 385-389.
- Taleon, V., Dykes, L., Rooney, W. L., & Rooney, L. W. (2012). Effect of genotype and environment on flavonoid concentration and profile of black sorghum grains. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 470-475. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.05.001>
- Taylor, J. R. N. (2018). Sorghum and millets: Taxonomy, history, distribution, and production. En *Sorghum and Millets: Chemistry, Technology, and Nutritional Attributes*. AACCI. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00001-0>
- Taylor, J. R. N., & Anyango, J. O. (2011). Sorghum Flour and Flour Products: Production, Nutritional Quality, and Fortification. En *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-380886-8.10012-1>
- Taylor, J. R. N., & Dewar, J. (2001). Developments in sorghum food technologies. En *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 43, Número C). [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(01\)43006-3](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(01)43006-3)
- Taylor, J. R. N., & Kruger, J. (2018). Sorghum and Millets. En Duod John & T. Kwaku (Eds.), *Sorghum and Millets*. AACCI. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811527-5.00007-1>
- Taylor, J. R. N., Schober, T., & Bean, S. (2006). Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *Journal of Cereal Science*, 44(3), 252-271. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.009>
- Taylor, J., & Taylor, J. R. N. (2002). Alleviation of the adverse effect of cooking on sorghum protein digestibility through fermentation in traditional African porridges. *International Journal of Food Science and Technology*, 37(2), 129-137. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2002.00549.x>

- Teobaldi, A. G., Barrera, G. N., Sciarini, L. S., & Ribotta, P. D. (2021). Pasting, gelatinization, and rheological properties of wheat starch in the presence of sucrose and gluten. *European Food Research and Technology*, 247(5), 1083-1093. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03689-y>
- Tester, R. F. (1997). Properties of damaged starch granules: Composition and swelling properties of maize, rice, pea and potato starch fractions in water at various temperatures. *Food Hydrocolloids*, 11(3), 293-301. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(97\)80059-8](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(97)80059-8)
- Theethira, T. G., Dennis, M., & Leffler, D. A. (2014). Nutritional consequences of celiac disease and the gluten-free diet. *Expert Review of Gastroenterology and Hepatology*, 8(2), 123-129. <https://doi.org/10.1586/17474124.2014.876360>
- Thompson, T. (2000). Folate, iron, and dietary fiber contents of the gluten-free diet. En *Journal of the American Dietetic Association* (Vol. 100, Número 11, pp. 1389-1396). [https://doi.org/10.1016/S0002-8223\(00\)00386-2](https://doi.org/10.1016/S0002-8223(00)00386-2)
- Thompson, T., Dennis, M., Higgins, L. A., Lee, A. R., & Sharrett, M. K. (2005). Gluten-free diet survey: Are Americans with coeliac disease consuming recommended amounts of fibre, iron, calcium and grain foods? *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 18(3), 163-169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-277X.2005.00607.x>
- Tiwari, U., & Cummins, E. (2009). Nutritional importance and effect of processing on tocols in cereals. *Trends in Food Science and Technology*, 20(11-12), 511-520. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.06.001>
- Trappey, E. F., Houryieh, H., Aramouni, F., & Herald, T. (2015). Effect of sorghum flour composition and particle size on quality properties of gluten-free bread. *Food Science and Technology International*, 21(3), 188-202. <https://doi.org/10.1177/1082013214523632>
- Tripathi, B., & Platel, K. (2013). Feasibility in fortification of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) and pearl millet (*Pennisetum glaucum*) flour with iron. *LWT - Food Science and Technology*, 50(1), 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.05.025>
- Tripathi, B., Platel, K., & Srinivasan, K. (2012). Double fortification of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) and finger millet (*Eleusine coracana* L. Gaertn) flours with iron and zinc. *Journal of Cereal Science*, 55(2), 195-201. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.11.008>
- Uranga, J. G., Podio, N. S., Wunderlin, D. A., & Santiago, A. N. (2016). Theoretical and experimental study of the antioxidant behaviors of 5-o-caffeoylquinic, quinic and caffeic acids based on electronic and structural properties. *ChemistrySelect*, 1(13), 4113-4120. <https://doi.org/10.1002/slct.201600582>
- USDA. (2021). Grain: World Markets and Trade. *United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service, November*, 1-11.
- van der Merwe, M., Osthoff, G., & Pretorius, A. J. (2005). Determining milling performance of sorghum cultivars by means of abrasive decortication and roller milling techniques. *South African Journal of Plant and Soil*, 22(4), 229-235. <https://doi.org/10.1080/02571862.2005.10634712>
- Vasanthakumari, P., & Jaganmohan, R. (2018). Process development and formulation of multi-cereal and legume cookies. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(12), 1-8. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13824>
- Velasco, J., Dobarganes, M. C., & Márquez-Ruiz, G. (2000). Application of the accelerated test Rancimat to evaluate oxidative stability of dried microcapsulated oils. *Grasas y Aceites*, 51. <https://doi.org/https://doi.org/10.3989/gya.2000.v51.i4.422>
- Velázquez, N., Sánchez, H., Osella, C., & Santiago, L. G. (2012). Using white sorghum flour for gluten-free

- breadmaking. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 63(4), 491-497. <https://doi.org/10.3109/09637486.2011.636734>
- Vitaglione, P., Mennella, I., Ferracane, R., Rivellese, A. A., Giacco, R., Ercolini, D., Gibbons, S. M., La Stora, A., Gilbert, J. A., Jonnalagadda, S., Thielecke, F., Gallo, M. A., Scalfi, L., & Fogliano, V. (2015). Whole-grain wheat consumption reduces inflammation in a randomized controlled trial on overweight and obese subjects with unhealthy dietary and lifestyle behaviors: Role of polyphenols bound to cereal dietary fiber. *American Journal of Clinical Nutrition*, 101(2), 251-261. <https://doi.org/10.3945/ajcn.114.088120>
- Vitali, D., Vedrına Dragojević, I., & Šebečić, B. (2008). Bioaccessibility of Ca, Mg, Mn and Cu from whole grain tea-biscuits: Impact of proteins, phytic acid and polyphenols. *Food Chemistry*, 110(1), 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.01.056>
- Walker, S., Seetharaman, K., & Goldstein, A. (2012). Characterizing physicochemical changes of cookies baked in a commercial oven. *Food Research International*, 48(1), 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.04.003>
- Wang, L., & Flores, R. A. (1999). The effects of storage on flour quality and baking performance. *Food Reviews International*, 15(2), 215-234. <https://doi.org/10.1080/87559129909541187>
- Wilde, P. J. (2000). Interfaces: Their role in foam and emulsion behaviour. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 5(3-4), 176-181. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(00\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(00)00056-X)
- Wilderjans, E., Luyts, A., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2013). Ingredient functionality in batter type cake making. *Trends in Food Science and Technology*, 30(1), 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.01.001>
- Wilderjans, E., Pareyt, B., Goesaert, H., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2008). The role of gluten in a pound cake system: A model approach based on gluten-starch blends. *Food Chemistry*, 110(4), 909-915. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.079>
- Williams, P. A., & Phillips, G. O. (2003). The use of hydrocolloids to improve food texture. En *Texture in Food* (Vol. 1). Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781855737082.2.251>
- Wolters, M. G. E., Schreuder, H. A. W., Van Den Heuvel, G., Van Lonkhuijsen, H. J., Hermus, R. J. J., & Voragen, A. G. J. (1993). A continuous *in vitro* method for estimation of the bioavailability of minerals and trace elements in foods: application to breads varying in phytic acid content. *British Journal of Nutrition*, 69(3), 849-861. <https://doi.org/10.1079/bjn19930085>
- Wrigley, C., Corke, H., & Walker, C. E. (2004). *Encyclopedia of grain Science* (C. Wrigley (ed.); First edit). Food Science Australia and Wheat CRC.
- Xie, F., Yu, L., Chen, L., & Li, L. (2008). A new study of starch gelatinization under shear stress using dynamic mechanical analysis. *Carbohydrate Polymers*, 72(2), 229-234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.08.007>
- Xiong, Y., Zhang, P., Warner, R. D., & Fang, Z. (2019). Sorghum Grain: From Genotype, Nutrition, and Phenolic Profile to Its Health Benefits and Food Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(6), 2025-2046. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12506>
- Yang, L., Allred, C. D., & Awika, J. M. (2014). Emerging evidence on the role of estrogenic sorghum flavonoid in colon cancer prevention. *Cereal Foods World*, 59(5), 244-251. <https://doi.org/10.1094/CFW-59-5-0244>
- Yang, L., Allred, K. F., Dykes, L., Allred, C. D., & Awika, J. M. (2015). Enhanced action of apigenin and naringenin combination on estrogen receptor activation in non-malignant colonocytes: Implications

- on sorghum-derived phytoestrogens. *Food and Function*, 6(3), 749-755. <https://doi.org/10.1039/c4fo00300d>
- Yetneberk, S., Rooney, L. W., & Taylor, J. R. N. (2005). Improving the quality of sorghum injera by decortication and compositing with tef. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(8), 1252-1258. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2103>
- Yoganandan, M., Bean, S. R., Miller-Regan, R., Dogan, H., Pulivarthi, M. K., & Siliveru, K. (2021). Effect of tempering conditions on white sorghum milling, flour, and bread properties. *Foods*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/foods10081947>
- Yousif, A., Nhepera, D., & Johnson, S. (2012). Influence of sorghum flour addition on flat bread in vitro starch digestibility, antioxidant capacity and consumer acceptability. *Food Chemistry*, 134(2), 880-887. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.199>
- Zhang, G., & Hamaker, B. R. (2005). Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) flour pasting properties influenced by free fatty acids and protein. *Cereal Chemistry*, 82(5), 534-540. <https://doi.org/10.1094/CC-82-0534>
- Zhao, Y., & Ambrose, R. P. K. (2017). Structural characteristics of sorghum kernel: Effects of temperature. *International Journal of Food Properties*, 20(11), 2630-2638. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1247099>
- Zhao, Y., & Ambrose, R. P. K. (2018). A Laboratory-Scale Tempering and Milling Method for Grain Sorghum. *Transactions of the ASABE*, 61(2), 713-721. <https://doi.org/10.13031/trans.12343>

Esta página está disponible en los siguientes idiomas:



Abstract Licencia Creative Commons

**Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0
Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)**

Este es un resumen legible por humanos de (y no un sustituto) de la licencia .

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .



CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable .

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad o derechos morales pueden limitar la forma en que utilizan el material.