



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES**

**Trabajo de Tesis Doctoral:**

***Harinas de avena enriquecidas con beta-glucanos como  
ingredientes nutricionales para panes de diferentes  
variedades de trigos argentinos. Optimización de  
parámetros de calidad industrial y nutricional***

**Tesista: Ing Agr. Mag. Valentina Astiz**

**Directora: Dra. M. Cecilia Puppo**

**Codirectora: Dra. M. Victoria Salinas**

**Año: 2023**

El presente trabajo de Tesis para optar al título de Doctor de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos (CIDCA-UNLP-CONICET) bajo la dirección de la Dra. María Cecilia Puppo y la codirección de la Dra. María Victoria Salinas. El mismo se desarrolló con fondos otorgados por la Cooperadora de la EEA- INTA Barrow, UNLP, la ANPCyT y el CONICET.

A partir de los resultados obtenidos de este trabajo de tesis doctoral obtuvimos las siguientes publicaciones:

\*High  $\beta$ -Glucans Oats for Healthy Wheat Breads: Physicochemical Properties of Dough and Breads. 2022. Astiz Valentina, Guardiarelli Luciano Martín, Salinas Maria Victoria, Brites Carla y Puppo Maria Cecilia. *Foods* 12(1): 170.

\*Propiedades fisicoquímicas de harinas de trigo y avena de alta calidad panadera. 2022. Astiz Valentina; Salinas Maria Victoria; Puppo Maria Cecilia. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP*. Numero 2. Volumen 121.

\* Modificaciones en la viscoelasticidad de masas de trigo como consecuencia del agregado de avena con alto contenido en  $\beta$ -glucanos. 2022. Astiz Valentina., Salinas M. Victoria, Puppo M. Cecilia. Libro de resumen del *VIII Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CICYTAC 2022)*. Presentación modalidad póster.

\*Evaluación de la calidad tecnológica de panes a partir de premezclas de trigo con harina de avena con alto contenido de  $\beta$ -glucanos. 2022. Astiz Valentina, Salinas María V., Puppo María C. Libro de resumen del Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. CLICAP 2022- San Rafael, Mendoza- Argentina. Presentación modalidad póster.

\*Comportamiento Reológico de Masas de Trigo Pan Formuladas con Mezclas de Trigo y Avena. 2019. Astiz Valentina, Salinas María V., Puppo María C. Libro de resumen del *XXI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ciencia y Tecnología de Alimentos & XVII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de los Alimentos*. 2019. Buenos Aires. Presentación modalidad póster.

\* Comportamiento industrial de trigos argentinos de calidad. 2017. Astiz, V., Salinas, M.V., Molfese, E.R., Puppo, M.C. Resumen presentado en *Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología Argentina (CYTAL)*. 2017. Buenos Aires. Presentación modalidad póster.

Dedico esta tesis a mi familia, especialmente a mis hijas Emma y Julia. A mi pareja Pascual por su apoyo, cariño y contención. A mis padres, Mariano y Marta, y a mi hermana Mariana por su cariño y apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A M. Cecilia Puppo y M. Victoria Salinas por haber confiado en mí. A mis compañeros de laboratorio de la EEI- Barrow: Maria Laura Seghezzeo, Dora Miguens, Eugenio Errea, Mauricio Capristo, Oscar Wehranhe y Elena Molfese por la ayuda en los ensayos y el apoyo brindado para que pueda dedicarle tiempo a la tesis.

A la EEI- Barrow por haberme dado la posibilidad, brindándome sus instalaciones y los fondos necesarios para realizar el doctorado. A Carlos Bertucci que fue quien me propuso e incentivo a que comience el doctorado y a Paula Pérez Mate que continuo en esta misma línea posibilitando finalizar mi formación.

A Adelina Larsen, Ana Storm y Verónica Caballero por el apoyo y la ayuda, no solo en los ensayos, sino también en lo personal.

A la Universidad Nacional de La Plata, la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales y al Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos (CIDCA) por haberme dado la posibilidad, brindándome sus instalaciones para realizar el doctorado.

A los integrantes del grupo del Laboratorio de Investigación en Alimentos Farináceos Saludables (LIAFaS) en especial a Luciano Guardianelli y a Juan Burbano por ayudarme y guiarme con algunos ensayos.

A la Cooperadora de la EEA- Barrow por haberme financiado la realización del doctorado.

A Liliana Wehranhne y Francisco Di pane por brindarme las muestras de avena y trigo para la realización del trabajo doctoral.

A todo el personal del CIDCA, en especial a Fernanda que me ayudó con el Texturómetro y a Yanina por los análisis nutricionales.

A mis compañeros de la EEA- Cesáreo Naredo y de la AER- Coronel Suarez, especialmente a José Arroquy y Dario Morris por haberme permitido continuar y finalizar la tesis doctoral.

A mi familia, por todo el cariño que me brindan y por estar siempre.

A todos ¡Muchísimas Gracias!

## RESUMEN

La avena (*Avena sativa* L.) es un cereal que, a diferencia del trigo pan (*Triticum aestivum* L.), no presenta la capacidad de desarrollar gluten, sin embargo, posee  $\beta$ -glucanos, que son considerados fibra soluble prebiótica con efectos beneficiosos para la salud. Estos componentes tienen potencial aplicación en alimentos funcionales, este grupo de alimentos hace referencia a aquellos que han demostrado afectar beneficiosamente algún/as función/es del cuerpo, de una forma relevante, incrementando el estado de salud o bienestar o reduciendo el riesgo de contraer enfermedades o de muerte, más allá de su efecto nutritivo intrínseco. Además, estos alimentos deben proporcionar su efecto benéfico al ser consumidos en las cantidades normales que se espera en la dieta. En este caso en particular, los componentes previamente mencionados de la avena, estimulan el sistema inmune, modulando la inmunidad humoral y celular, y por lo tanto tienen efecto beneficioso en la lucha contra las infecciones (bacterianas, virales, micóticas y parasitarias). Además, exhiben propiedades hipocolesterolémicas, entre otras. La sensibilidad de los consumidores sobre la importancia de los alimentos funcionales ha crecido mucho en los últimos años. Por lo que elaborar premezclas con harina de trigo permitiría mejorar el perfil nutricional de los panes. El objetivo general de este trabajo fue analizar la calidad industrial, nutricional y vida útil de harinas de trigo y de avena de alto contenido de  $\beta$ -glucanos obtenidas en el laboratorio del INTA. Se tuvo también como objetivo formular premezclas con y sin trigo pan y evaluar las características nutricionales, sensoriales y vida útil de los panificados obtenidos.

Para esto se utilizaron tres variedades de trigo pan: Buck Meteoro, MS INTA BONAERENSE 514 y ACA 356; y nueve variedades de avena: Bonaerense INTA Calen, Bonaerense INTA Mana, Bonaerense INTA Maja, Bonaerense INTA Yapa, Bonaerense INTA Aiken, Bonaerense INTA Sureña, INTA Elizabeth, Bonaerense INTA Payé y Paloma INTA. Todos estos cultivares mencionados fueron provistos por el grupo de mejoramiento de la Chacra Experimental Integrada INTA- Barrow. Luego del análisis de los granos y de las harinas, se eligió una variedad de avena y una de trigo para la obtención de premezclas y se continuó con todo el estudio posterior de masas y panificados.

En primer lugar, se caracterizó el grano y las harinas de trigo pan y avena, así como también la evaluación de la vida útil de las harinas puras y de las mezclas. A partir de estos resultados surgió que la variedad Buck Meteoro fue superior en sus aptitudes industriales por tal motivo fue la elegida para utilizar en las premezclas. En cuanto a la avena, la evaluación de los tratamientos térmicos sobre el grano con el objetivo de reducir al mínimo la actividad de la lipasa y así preservar las características de los productos de molienda, que luego serán utilizados en la elaboración de panificados, mostró resultados satisfactorios con 60 segundos de exposición a microondas

logrando en este caso temperaturas intergranarias similares a las obtenidas en la industria y una actividad enzimática significativamente inferior y aceptable. La calidad nutricional de las harinas puras mostró en avena buenos valores de contenido de  $\beta$ -glucanos y fibra dietaria total (componentes de interés para la confección de panificados funcionales); en el caso de trigo, los valores fueron similares a lo hallado en bibliografía. La vida útil de las harinas, evaluada durante 10 meses de almacenamiento, mostró que en ese período de tiempo no hubo ningún tipo de deterioro. Luego de estos análisis elegimos como variedad de trigo pan a Buck Meteoro por ser superior en aptitud industrial y la variedad Bonaerense INTA Calen, por ser la más utilizada en la industria argentina. Con esas harinas puras se realizaron mezclas por adición de harina de avena a la harina de trigo: 5g harina de avena + 100 de harina de trigo pan; 15g harina de avena + 100 de harina de trigo pan; y 25g harina de avena + 100g de harina de trigo pan. Como resultado del análisis de las mezclas se evidenció un aporte de componentes hidrofílicos por parte de la harina de avena. A su vez, el alto contenido de fibra dietaria total condujo a cambios en atributos texturales de la masa. El análisis reológico mostró que la adición de avena se tradujo en aumentos de la tenacidad alveográfica (masas más duras) y un comportamiento farinográfico inverso al observado comúnmente en las harinas de trigo pan; es decir, mezclas con mayor proporción de avena mostraron estabilidades mayores y aflojamientos más bajos. Se observaron también incrementos importantes en los parámetros de textura, dureza y gomosidad de la masa, sin cambios significativos en la cohesividad; es decir, no se produjo disrupción de la red de gluten. Los ensayos de relajación mostraron que la mezcla con mayor contenido de avena dio 10 veces más alto los valores de esfuerzo, respecto a la masa control de trigo.

Finalmente, el análisis de los panes mostró mejoras en parámetros nutricionales, aunque con disminuciones en el volumen específico y en el color de la corteza de los mismos. La miga evidenció aumentos significativos en los parámetros: firmeza y masticabilidad a medida que el agregado de avena aumentó. Frente al almacenamiento, los panes mostraron aumentos en la dureza y un mayor desgrane de la miga. En cuanto a los parámetros nutricionales, los lípidos, la fibra dietaria total y los  $\beta$ -glucanos aumentaron significativamente por el agregado de avena. El análisis sensorial evidenció altos porcentajes de respuesta con calificaciones “bueno” a “muy bueno” dentro de la escala hedónica seleccionada; sugiriendo que el agregado de avena no generó rechazo de los panes con avena por parte del consumidor. Se obtuvo una formulación libre de trigo pan que también mostró mejoras nutricionales en lo que hace a contenido de fibra dietaria y de  $\beta$ -glucanos en base a una variedad de trigo y de avena de alto  $\beta$ -glucanos de variedades argentinas.

## ABSTRACT

Oat (*Avena sativa* L.) is a cereal that, unlike bread wheat (*Triticum aestivum* L.), does not have the ability to develop gluten, however, has  $\beta$ -glucans, compounds that are considered prebiotic soluble fiber with beneficial health effects. These components have potential application in functional foods, this group of foods refers to those that have been shown to beneficially affect some functions of the body, in a relevant way, increasing the state of health or well-being or reducing the risk of contracting diseases or death, beyond its intrinsic nutritional effect. Furthermore, these foods must provide their beneficial effect when consumed in the normal amounts expected in the diet. In this particular case, the oat components we mentioned recently have been reported to stimulate the immune system, modulating humoral and cellular immunity, and therefore have a beneficial effect in the fight against infections (bacterial, viral, fungal and parasitic). In addition, they exhibit hypocholesterolemic properties, among others. The attention of consumers about the importance of functional foods has grown a lot in recent years. Therefore, preparing premixes with oat and wheat flours would improve the nutritional profile of breads. The general objective of this work was to analyze the industrial and nutritional quality and also, the shelf-life of wheat and oat flours with a high content of  $\beta$ -glucans, obtained in an INTA's lab. The objective was also to formulate blends with oat and flours with and without wheat gluten, and to evaluate the nutritional, sensory characteristics and shelf-life of the baked goods obtained.

For this purpose, three varieties of bread wheat were used: Buck Meteoro, MS INTA BONAERENSE 514 and ACA 356; and nine oat varieties: Bonaerense INTA Calen, Bonaerense INTA Mana, Bonaerense INTA Maja, Bonaerense INTA Yapa, Bonaerense INTA Aiken, Bonaerense INTA Sureña, INTA Elizabeth, Bonaerense INTA Payé and Paloma INTA. All these cultivars were provided by the breeding group of the Experimental farm of INTA-Barrow. After the analysis of grains and flours, only one variety of oats and one variety of wheat were chosen to obtain blends and perform all the subsequent studies of dough and baking. Firstly, the analysis of the production and characterization of bread and oat wheat flours was carried out, as well as the evaluation of the shelf-life of the pure flours and of the mixtures. From this study, we could conclude that Buck Meteoro was superior in its industrial aptitudes and, for this reason, it was chosen for the following studies. In the case of oats, with the aim of reducing lipase activity for preserving the characteristics of the milled products which will later be used in the production of baked goods, the effect of heat treatments were evaluated. Satisfactory results with 60 seconds of exposure to microwaves was obtained, achieving inter-grain temperatures similar to those obtained in the industry and a significantly lower and acceptable enzymatic activity. Nutritional quality of pure oat flours showed notable contents for  $\beta$ -glucans and total dietary fiber (components of interest for the preparation of functional bread products); in the case of wheat, the values were similar to those found in the literature. The shelf-life of the flours, evaluated during 10 months of storage, showed that in this period of time there was no deterioration. After these analyses, we selected Buck Meteoro as bread wheat variety for being superior at some industrial characteristics and the Bonaerense INTA Calen variety, for being the most used in the Argentine industry. With these pure flours, blends were made by adding oat flour to wheat flour at different levels: 5g oat flour



+ 100g wheat bread flour; 15g oat flour + 100g wheat bread flour; and 25g oat flour + 100g wheat bread flour. Considering the analyses of the blends, a contribution of hydrophilic components of the oat flour was evidenced in the blend. In turn, the high content of total dietary fiber led to changes in textural attributes of the dough. The rheological analysis showed that the addition of oat resulted in the increase in alveographic tenacity (harder dough) and the farinographic behavior was inverse to that commonly observed in bread wheat flours; that is, mixtures with a higher proportion of oats showed higher stabilities and lower dough softening. Significant increases in the parameters of texture, hardness and gumminess of dough, were also observed; without significant changes in cohesiveness; that is, there was no disruption of gluten network. The relaxation tests showed that the blend with the highest oat content gave 10 times higher stress values compared to the wheat control dough.

Finally, the analysis of the breads showed improvements in nutritional parameters, although with decreases in the volume and color of their crust. The crumb showed significant increases in the parameters: firmness and chewiness as the addition of oats increased. After storage, the breads showed an increase in hardness and a greater crumb shelling. Regarding the nutritional parameters: lipids, total dietary fiber and  $\beta$ -glucans increased significantly by the addition of oats. The sensory analysis showed high response percentages with "good" to "very good" ratings within the selected hedonic scale; suggesting that the addition of oat flour did not generate consumer rejection of breads. A gluten-free formulation for bread was obtained, and also showed nutritional improvements in terms of total dietary fiber and  $\beta$ -glucan contents. High nutritional quality breads, with and without gluten, formulated with Argentine varieties of bread-wheat and oat with high  $\beta$ -glucans, were obtained.

<b>INDICE</b>	
<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>1- TRIGO</b>	<b>14</b>
<b>2- ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DEL GRANO DE TRIGO</b>	<b>15</b>
2.1. Estructura del grano de trigo	15
2.2. Composición del grano de trigo	17
<b>3- PROCESO DE MOLIENDA DE TRIGO PAN</b>	<b>18</b>
<b>4- HARINA DE TRIGO PAN</b>	<b>19</b>
4. 1. Tipificación de las harinas de trigo	19
4.2. Componentes de la harina de trigo	20
<b>5- PROCESO DE PANIFICACIÓN</b>	<b>29</b>
5.1. Amasado y Fermentación	29
5.2. Horneado	32
5.3. Vida útil: envejecimiento del pan	32
<b>6- AVENA</b>	<b>34</b>
6.1. Estructura y composición del grano de avena	35
6.2. Fibra dietaria y $\beta$ -glucanos del grano de avena	36
6.3. Procesamiento y molienda de avena	39
6.4. Harina de avena	39
<b>7- ENFERMEDADES RELACIONADAS AL CONSUMO DE CEREALES</b>	<b>42</b>
7.1. La avena y la enfermedad celíaca	42
7.2. Sensibilidad no celíaca al gluten y alergia al trigo	45
<b>8- ALIMENTOS FUNCIONALES</b>	<b>46</b>
8.1. Panificados funcionales	49
8.2. Panes con avena	50
<b>HIPÓTESIS</b>	<b>52</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>52</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>52</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>52</b>
<b>2.1. MATERIALES</b>	<b>55</b>
2.1.1. Trigo	55
2.1.2. Avena	55
<b>2.2. MÉTODOLÓGÍA</b>	<b>56</b>

2.2.1. Producción, calidad y vida útil de harinas	56
2.2.1.1. Caracterización de los granos de ambos cereales	56
2.2.1.2. Tratamiento térmico del grano de avena	56
2.2.1.3. Molienda de granos	58
2.2.1.4. Caracterización física de las harinas obtenidas de la molienda	58
2.2.1.5. Caracterización química y funcional de las harinas obtenidas de la molienda	59
2.2.1.6. Caracterización nutricional/química del producto de molienda.	64
2.2.2. Desarrollo de premezclas de harina de trigo pura con harina de avena de alto contenido en $\beta$ -glucanos.	70
2.2.2.1. Caracterización fisicoquímica y funcional de las premezclas	70
2.2.3. Caracterización de masas para pan	71
2.2.4. Elaboración y evaluación de la calidad panadera	75
2.2.5. Calidad sensorial de panes	79
2.2.6. Vida útil de los panes	79
2.2.7. Elaboración de panificados libres de trigo pan	80
<b>3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN. GRANOS Y HARINAS</b>	<b>86</b>
3.1. Caracterización de los granos de trigo	86
3.2. Caracterización fisicoquímica y funcional de las harinas puras	88
3.3. Tratamiento térmico del grano de avena	97
3.4. Caracterización nutricional de las harinas de avenas y trigo de variedades puras	99
3.5. Evaluación de la vida útil de harinas puras y en mezcla de trigo pan y avena	102
<b>CONCLUSIONES PARCIALES</b>	<b>105</b>
<b>4- RESULTADOS Y DISCUSIÓN. PREMEZCLAS Y MASAS</b>	<b>108</b>
4.1. Caracterización de las premezclas	108
4.2. Formulación de las masas	109
4.3. Comportamiento reológico de las masas	109
4.4. Evaluación de las propiedades de hidratación de las masas	122
<b>CONCLUSIONES PARCIALES</b>	<b>124</b>
<b>5- RESULTADOS Y DISCUSIÓN. PANES</b>	<b>126</b>
<b>PANES CON TRIGO PAN</b>	<b>126</b>
5.1. Optimización del tiempo de fermentación	126
5.2. Evaluación de la calidad panadera	128
5.3. Estabilidad de los panes frente al almacenamiento	135
5.4. Composición nutricional de los panes	141
5.5. Calidad sensorial de panes	142
<b>PANES LIBRES DE TRIGO PAN</b>	<b>146</b>

<b>5.6. Elaboración de panificados libres de trigo pan y optimización del tiempo de fermentación</b>	<b>146</b>
<b>5.7. Evaluación de las características fisicoquímicas de los panes del diseño de mezclas</b>	<b>148</b>
<b>5.8. Optimización de la formulación del pan sin trigo</b>	<b>158</b>
<b>5.9. Evaluación de las características nutricionales del pan óptimo</b>	<b>160</b>
<b>CONCLUSIONES PARCIALES</b>	<b>161</b>
<b>CONCLUSIONES FINALES</b>	<b>163</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>165</b>

# **CAPÍTULO I**

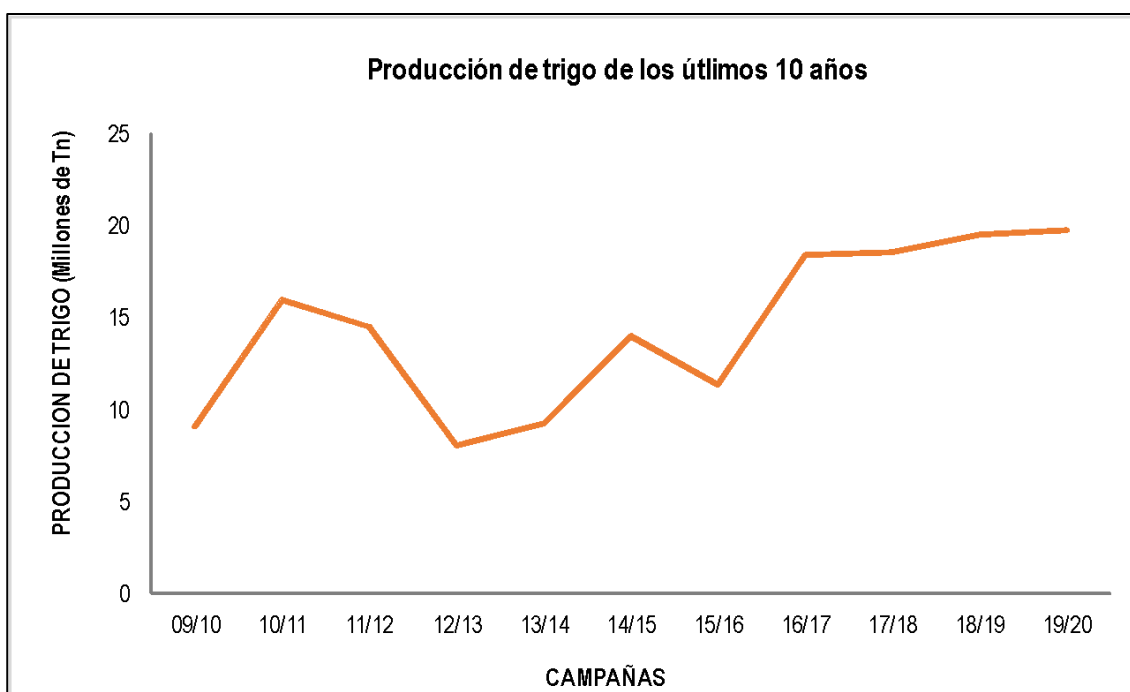
## **INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

### 1- TRIGO

El trigo es un cereal originario del oeste de Asia que se cultiva desde hace más de 6.000 años. Actualmente constituye el cultivo más difundido en el mundo abarcando una superficie cosechada de 219 millones de hectáreas (has) por año, seguido por el maíz (177 millones has), el arroz (162 millones has) y la soja (108 millones de has). Estos cuatro cultivos cubren el 50% de la superficie cosechada mundial. Desde el punto de vista productivo, el trigo ocupa el cuarto lugar a nivel mundial luego de la caña de azúcar, el maíz y el arroz con cáscara (Abbate., 2017).

En la campaña 2019/20, en Argentina se produjeron 19.750.000 toneladas (Tn) de trigo, encontrándose entre los 13 principales países productores de trigo del mundo (Figura 1.1). Dentro del país, la producción de trigo se ubica en el puesto número 4 (FAOSTAT, 2019).



**Figura 1.1.** Producción de Trigo en Argentina en los últimos 10 años. Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2020.

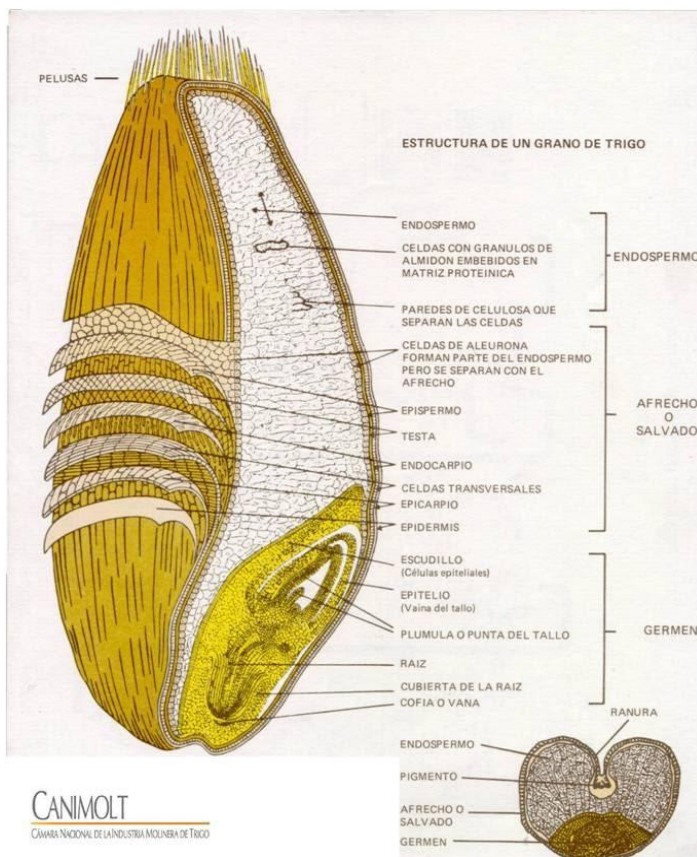
Según la Federación Argentina de la Industria Molinera, la molinería ocupa un lugar relevante dentro de la producción agroindustrial del país, en la campaña 2019/20 se registró una producción de 6,5 mil Tn. El consumo de harina de trigo en nuestro país fue de 117,7 Kg/hab/año para

2018/19, posicionándose como el quinto país con mayor consumo humano del mundo (Alimentos Argentinos, 2019).

## 2- ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DEL GRANO DE TRIGO

### 2.1. Estructura del grano de trigo

El trigo pertenece a la familia de las gramíneas y al género *Triticum*. Las especies cultivadas más importantes desde el punto de vista comercial son: *Triticum aestivum* y *Triticum durum*. Los miembros de esta familia generan frutos secos con una sola semilla. Este tipo de fruto es un cariopse o cariósipide que vulgarmente se denomina grano. En la Figura 1.2, puede observarse el corte longitudinal y transversal del grano de trigo.



**Figura 1.2.** Corte longitudinal y transversal de un grano de trigo. (Fuente: <http://www.canimolt.org/trigo/estructura-del-grano>).

*Grano de trigo.* La longitud del grano es, en término medio, de 8 mm, con un peso de 35 mg. El tamaño de los granos varía ampliamente según la variedad y la posición en la espiga. Los granos

de trigo son redondeados en la parte dorsal (mismo lado del germen) y posee un surco a lo largo de la parte ventral (lado opuesto al germen) (Figura 1.2). El surco, que abarca aproximadamente toda la longitud del grano, penetra casi hasta el centro. Los dos laterales pueden llegar a tocarse ocultando así la verdadera profundidad del surco. Este surco, no solamente representa una dificultad para que el molinero separe el salvado del endospermo con buen rendimiento, sino que también constituye un buen escondite para microorganismos y polvo (Hoseney, 1991). También presenta un grupo de pelos o tricomas en el extremo superior, denominado pincel o cepillo, que constituye un lugar de adherencia de tierra y esporas (Dimitri Milán, 1978).

El pericarpio rodea toda la semilla y está constituido por varias capas. El pericarpio exterior (en la Figura 1.2, epidermis) es lo que los molineros llaman "beeswing" (alas de abeja). La parte más interna del pericarpio exterior, hipodermis y capas subyacentes, está formada por restos de células de pared delgada, integrado por células intermedias, células cruzadas y células tubulares, que presentan una disposición cruzada, que deja mucho espacio intercelular (Mabille y col., 2001). Esta disposición de células favorece durante la molienda la remoción del pericarpio, pero si éste no se encuentra adecuadamente hidratado, favorece que se fraccione en partículas pequeñas que alteran la calidad de las harinas modificando sus propiedades tecnológicas (Hoseney, 1991). El pericarpio comprende el 5% del grano y está formado aproximadamente por un 6% de proteínas, un 2% de cenizas, un 20% de celulosa, 0,5% de lípidos y un 70% de pentosanos que, junto con la celulosa, son los componentes que le otorgan su alta capacidad de absorción de agua (valores expresados sobre base seca) (Mabille y col., 2001).

*Cubierta de la semilla y epidermis nucelar.* La cubierta de la semilla está unida firmemente a las células tubulares por su lado exterior y a la epidermis nucelar por el interior (Figura 1.2) (Kugler y Godoy, 1964; Mabille y col., 2001). Está compuesta por tres capas: una cutícula exterior gruesa, una capa pigmentada (en los trigos coloreados) y una cutícula interior fina. El espesor de la cubierta de semilla varía entre 0,5 y 0,8 mm y la epidermis nucelar alcanza unos 0,7 mm de espesor (Tarabiono, 1979).

*Capa de aleurona.* Por lo general tiene el espesor de la célula (Figura 1.2) (Kugler y Godoy, 1964), rodea el grano por completo, incluyendo el endospermo feculento y el germen (Dupont y Altenbach, 2003). Desde el punto de vista botánico, es la capa exterior del endosperma. Sin embargo, se elimina durante la molienda, junto con la epidermis nucelar, la cubierta de la semilla y el pericarpio, constituyendo lo que en el proceso de molienda se denomina salvado (Antoine y col., 2002). Las células de aleurona tienen paredes gruesas formadas principalmente por celulosa.



Su forma es esencialmente cúbica y carecen de almidón. Las células de aleurona poseen un núcleo grande y numerosos gránulos proteicos y tienen un papel fundamental en la germinación (Ritchie y col., 2000). La capa de aleurona es relativamente rica en minerales, proteínas, fósforo total y fósforo en forma de fitatos, lípidos y niacina (Shewry y Halford, 2002). Además, la aleurona es más rica en tiamina y riboflavina que otras partes del salvado y su actividad enzimática es alta.

*Germen o embrión.* El germen de trigo abarca el 2,5 - 3,5% del grano. Está constituido por dos partes principales: el eje embrionario (raíz y tallo rudimentarios) y el escutelo, que tiene el rol de tejido de almacenamiento (Kugler y Godoy, 1964). El germen es relativamente rico en proteína (25%), azúcar (18%), aceite (16% en el eje embrionario y 32% en el escutelo) y cenizas (5%). No contiene almidón, pero es bastante rico en vitamina B y vitamina E (tocoferol total, hasta 500 ppm) además de muchas enzimas. Los azúcares son principalmente sacarosa y rafinosa, reservas vinculadas mayormente con los mecanismos de respiración para la germinación.

*Endospermo.* El endospermo o endosperma es el tejido nutricional formado en el saco embrionario de las plantas con semillas; es triploide (con tres juegos de cromosomas) y puede ser usado como fuente de nutrientes por el embrión durante la germinación. Está conformado por células muy apretadas y gránulos de almidón incrustados en una matriz proteica (Hoseney, 1991; Dupont y Altenbach, 2003). Una de las características más importante es su textura, dura o blanda, refiriéndose de esta manera a la resistencia que ofrece el grano a transformarse en harina (Campbell y col., 2007). Los endospermas duros, dependiente en parte de la genética, se separan más fácilmente del pericarpio, produciendo mayores rendimientos de harina con menores contenidos de cenizas (Turnbull y Rahman, 2002; Chang y col., 2006). A su vez, los endospermas duros presentan una mayor asociación entre el almidón y las proteínas que los de textura blanda, requiriendo así mayor energía en la molienda. Las paredes celulares del endosperma están formadas por pentosanos (Turnbull y Rahman, 2002; Dupont y Altenbach, 2003), otras hemicelulosas y  $\beta$ -glucanos, con mayor afinidad por el agua que la celulosa. El endosperma y las paredes celulares del mismo, constituyen la harina.

## 2.2. Composición del grano de trigo

La composición química del grano de trigo se presenta en la Tabla 1.1, esta puede variar según la zona y el año de cosecha. Como puede observarse, la mayor parte del grano está formada por almidón, proteínas y agua.

**Tabla 1.1.** Composición química del grano entero de trigo.

Componente	Composición porcentual (%)
Humedad	8,0 – 18,0
Proteínas	7,0 – 18,0
Lípidos	1,5 – 2,0
Almidón	60,0 – 68,0
Fibra cruda	2,0 – 2,5
Cenizas	1,5 – 2,0

Fuente: Matz, 1999.

### 3- PROCESO DE MOLIENDA DE TRIGO PAN

El objetivo del proceso de molienda en trigo es separar el endospermo del germen y del salvado; para así obtener la harina.

El primer paso del proceso de molienda es la *limpieza*. El objetivo es eliminar impurezas que suelen acompañar al trigo: piedras, paja, arena, polvo, metales, otras semillas, entre otros. Para esto, el trigo pasa a través de un sistema de tamices y de imanes con los que se separan partículas más densas como piedras y metales (Catterall, 1998).

Luego sigue el  *acondicionamiento* donde se adiciona agua al grano de trigo para lograr la humedad óptima de molienda. La humedad del grano se incrementa a 14-16%, de esta manera se logra que el pericarpio se vuelva más flexible y laminable, esto facilita la separación de las capas de salvado del endosperma y permite obtener fragmentos de mayor tamaño. Al final del proceso de molienda, la harina se obtiene con 14% de humedad, esto es producto de la eliminación del salvado y del calor generado en el proceso de molienda.

Una vez realizado el acondicionamiento de los granos, éstos se someten al proceso de *rotura*, en esta etapa, se liberan partículas del endosperma con la mínima desintegración posible del salvado (Webb y Owens, 2003). Los granos pasan por un sistema de 4 a 6 pares de rodillos estriados, en cada par de rodillos la velocidad de giro de uno duplica la del otro, lo cual genera la ruptura y extracción del endosperma. Como resultado, se obtienen partículas de diferente tamaño, las más grandes corresponden a la sémola. Todos los productos resultantes de esta etapa pasan por un cernido, donde se separan las subfracciones y se envían hacia los rodillos de *reducción*. En esta etapa se obtiene algo de harina que, sin pasar por el resto del proceso, se tamiza y separa.

Luego las partículas comienzan la etapa de *purificación* que consiste en el pasaje a través de purificadores, rodillos de molienda y tamices. Los purificadores tienen la función de separar las partículas en base a diferencias de tamaño y peso específico, consisten en tolvas receptoras con diferente tamaño de poro, a través de las cuales pasa una corriente de aire. Las partículas del endosperma, que son más pesadas, permanecen en el tamiz hasta que encuentran un tamaño de poro tal que les permite atravesarlo y caen a la tolva que se encuentra debajo. Las partículas de salvado, que son más livianas, son arrastradas por el flujo de aire para ser eliminadas del circuito. El material obtenido en esta etapa pasa, casi en su mayoría, al sistema de reducción, mientras que el remanente vuelve al sistema de rotura. En general, la purificación del material que proviene de la primera y segunda rotura da lugar al endosperma puro, mientras que de la purificación de roturas posteriores se obtiene material con mayor contenido de salvado (Webb y Owens, 2003). Por último, vamos a describir la etapa de *reducción*, es el último paso y, por lo tanto, en ella se obtiene la harina con las características buscadas. Para esto se emplean hasta 12 pares de cilindros de compresión lisos que giran con diferente velocidad para reducir el tamaño de las partículas de harina. Las harinas que salen de esta etapa poseen diferentes calidades, lográndose la harina de mejor funcionalidad para panificación a partir de los primeros cilindros. El material obtenido en cada par de cilindros de reducción pasa a través de un cernedor oscilatorio que lo clasifica, la harina se separa y las fracciones restantes, con mayor tamaño de partícula, pasan al cilindro siguiente. Un punto importante es la compresión que realizan los cilindros en esta etapa porque produce la rotura de los gránulos de almidón, lo cual tiene incidencia en la absorción de agua de la harina resultante y por ende la calidad final del producto.

#### **4- HARINA DE TRIGO PAN**

##### 4. 1. Tipificación de las harinas de trigo

El Código Alimentario Argentino (CAA) en su Capítulo IX, artículo 661 (Res. 167.26.1.82) define como "Harina" al producto obtenido de la molienda del endosperma del grano de trigo y tipifica comercialmente a las harinas del siguiente modo: cuatro ceros (0000), tres ceros (000), dos ceros (00), cero (0), medio cero (medio 0), harinilla de primera y harinilla de segunda, las cuales se obtienen de la molienda gradual y metódica del endosperma en cantidad de 70-80% del grano limpio.

En la Tabla 1.2 se muestran las características de los diferentes tipos de harinas. La tipificación de las harinas se basa en: 1) el contenido de cenizas determinado a 900-920°C (calculadas sobre

base seca); 2) la humedad determinada a 130°C durante una hora; 3) la absorción farinográfica de agua (cantidad de agua que absorben 100 g de harina) y 4) el volumen de pan que puede obtenerse a partir de 100 g de harina.

**Tabla 1.2.** Tipificación comercial de las harinas según el Código Alimentario Argentino (CAA, 2022).

Harina tipo	Humedad (g/100g) (máx.)	Cenizas (g/100g) (máx.)	Absorción (g/100g)	Volumen pan (cm <sup>3</sup> )
0000	15,0	0,492	56-62	550
000	15,0	0,650	57-63	520
00	14,7	0,678	58-65	500
0	14,7	0,873	60-67	475
½ 0	14,5	1,350	-	-

En la determinación de cenizas se admite una tolerancia de hasta un 3% sobre los valores establecidos para las harinas 000. Se debe rotular como “harina” o “harina de trigo” con la tipificación correspondiente.

#### 4.2. Componentes de la harina de trigo

La composición promedio de la harina de trigo se muestra en la Tabla 1.3. En su mayoría está compuesta por almidón, proteínas y agua.

**Tabla 1.3.** Composición química de la harina de trigo.

Componente	Composición porcentual (%)
Humedad	14,0
Proteínas	10,0 – 12,0
Lípidos	2,0
Almidón	70 - 75
Pentosanos	2,0 – 3,0
Cenizas	0,5

El 73% de la harina obtenida se utiliza en la fabricación de pan, siendo las harinas de trigo, y en menor grado la de centeno, las únicas que resultan panificables. Esta particularidad de la harina

de trigo se debe a las características de las proteínas de reserva gliadinas y gluteninas presentes en el grano (Lindsay y Skerritt, 1999; Shewry y col., 2001).

#### 4.2.1. Cenizas

Los minerales en el grano de trigo se encuentran principalmente en las cubiertas externas y en el germen por lo que durante la molienda se pierden considerablemente su contenido en relación al grano, siendo cada vez menor a medida que se obtienen harinas más refinadas. Una manera de cuantificarlos es mediante la determinación de cenizas siendo el valor promedio encontrado en harina de 0,5% (Tabla 1.3). Hace ya casi 60 años, en el año 1964, Czerniejewski y col. habían ya evaluado los minerales presentes en la harina de trigo encontrando principalmente potasio (K), fósforo (P), magnesio (Mg), calcio (Ca), sodio (Na), cinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), molibdeno (Mo) y cobalto (Co). Además de los minerales, en las capas más externas del grano se ubica la fibra, por lo que harinas menos refinadas presentan altos contenidos de cenizas y son más oscuras por lo que pueden oscurecer al producto terminado, por lo que resulta interesante tener en cuenta estas características en la elección de la harina (Wheat Marketing Center, 2004).

#### 4.2.2. Lípidos

Los lípidos representan aproximadamente el 2,5% de la harina, por lo que son compuestos minoritarios. El 1% corresponden a lípidos apolares y están formados por triglicéridos, diacilglicéridos, ácidos grasos libres y ésteres de colesterol; el 1,5% restante son polares y están formados por glicéridos de galactosa (0,6%) y fosfolípidos (0,9%), los cuales forman complejos de inclusión con la amilosa.

Durante la etapa de amasado, en el proceso de panificación, los lípidos interactúan con otros componentes de la harina, especialmente con las proteínas, modificando la estructura del gluten, de esta manera, son los encargados de soportar estructuralmente al gluten en la masa. Los lípidos en el gluten están principalmente asociados a las gluteninas (Chung y col., 1978).

#### 4.2.3. Pentosanos

La harina de trigo contiene hemicelulosas solubles e insolubles en agua conocidas como pentosanos. Los pentosanos insolubles en agua son más ramificados que los pentosanos

hidrosolubles y se hinchan profundamente en el agua (Turnbull y Rahman, 2002). Contrariamente a las proteínas hidrosolubles de los cereales, los pentosanos solubles pueden absorber de 15 – 20 veces más agua (Wang y col., 2002) y, de este modo, formar soluciones altamente viscosas. Los pentosanos insolubles son los responsables de las propiedades reológicas de la masa (Wang, 2003; Philippe, 2006), de la conducta panificable del centeno y aumentan la humedad de la corteza de los productos de panadería. Los pentosanos también juegan un papel importante en las propiedades panificables del trigo, puesto que participan en la formación del gluten (Wang y col., 2002). Este rol puede afectar de diversa manera a la formación y performance del gluten. Las fracciones extraíbles con agua tienen la capacidad de inmovilizar agua (Rouau y Moreau, 1993) y de formar soluciones viscosas mediante entrecruzamiento (Izydorczyk y col. 1990), que son atributos importantes que tienen implicancias en la formación del gluten y sus propiedades. La alta capacidad de retener agua de los pentosanos altera la distribución de la humedad entre los constituyentes de la masa y por ende sus propiedades reológicas (Jelaca y Hlynka, 1972; Kim y D'Appolonia, 1977 a). En general tienen un efecto positivo, y las variaciones observadas dependen de la variedad (Izydorczyk y col., 1991), de su contenido en la harina, de su extractabilidad en agua y de su estructura básica (Rouau y col., 1994; Izydorczyk y col., 1991). En cambio, los pentosanos insolubles afectan en forma negativa la calidad panadera, incrementando la absorción de agua farinográfica (Denli y Ercan, 2001), disminuyendo la extensibilidad como también la formación y el rendimiento en gluten (Michniewicz y col., 1991).

Los  $\beta$ -glucanos son polisacáridos lineales, con unidades de D-glucopiranosas unidas por enlaces  $\beta$ -1,3 y  $\beta$ -1,4. El grano de trigo contiene solamente 0,5 – 2 % de sustancias mucilaginosas. Estas sustancias confieren una gran viscosidad a las soluciones acuosas.

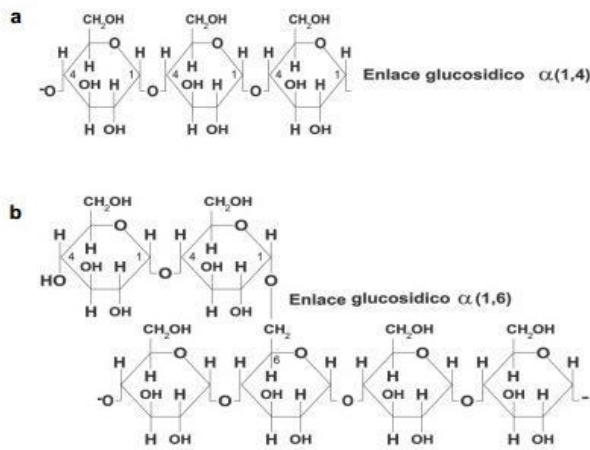
#### 4.2.4. Almidón

El polisacárido de reserva del grano de trigo es el almidón y se encuentra en las células del endosperma empaquetado en forma de gránulos. Está compuesto por dos polímeros de glucosa: amilosa (25%) y amilopectina (75%), que representan aproximadamente entre el 15 y el 50% de la harina de trigo, respectivamente.

La amilosa es, fundamentalmente, un polímero lineal de glucosas unidas por uniones glucosílicas ( $\alpha$ -D 1-4) (Figura 1.3 a), de tamaño variable (entre 200 a 6000 unidades de glucosa). Un extremo del polímero cuenta con grupos hidroxilos y grupos aldehídos que le otorgan el poder reductor; el otro extremo es no reductor y la cantidad de hidroxilos presentes determina la afinidad por el agua y la solubilidad (Ao y Jane, 2007). Presenta forma helicoidal y forma geles. Es menos voluminosa

que la amilopectina y, durante el proceso de gelatinización, difunde hacia y a través de la superficie, saliendo del gránulo hacia la solución intersticial. En la panificación, junto a la amilopectina, la amilosa está asociada a la retrogradación, dado que ese retorno a la cristalinidad implica una disminución en la capacidad de retención de agua (Hug-Iten y col., 2003).

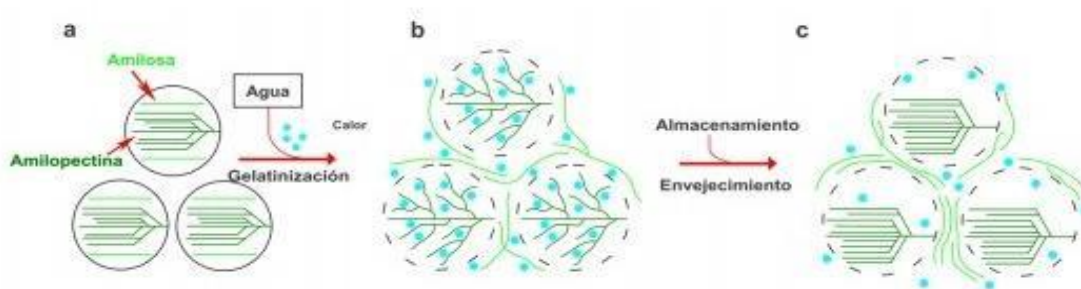
La amilopectina (Figura 1.3 b) forma estructuras fuertemente ramificadas, con cadenas lineales de glucosa unidas mediante uniones  $\alpha$  (1-4) y posee ramificaciones en uniones  $\alpha$  (1-6) cada 20-26 unidades monoméricas. Tiene escasa movilidad, debido a su alto peso molecular. A diferencia de la amilosa, no es capaz de formar geles (Ao y Jane, 2007). La combinación de los tipos de ramificaciones, le confiere regiones cristalinas y amorfas alternas, generando un polímero semicristalino.



**Figura 1.3.** Estructuras de: a) amilosa, b) amilopectina.

La estructura del gránulo de almidón es semicristalina, puesto que es posible distinguir zonas amorfas y cristalinas (20-40%) alternadas. Las zonas amorfas están principalmente formadas por amilosa y son menos densas mientras que las zonas cristalinas están formadas principalmente por doble hélices de amilopectina (Figura 1.4.a). Los gránulos de almidón tienen la capacidad de absorber agua si se prepara una suspensión de almidón en exceso con agua a temperatura ambiente, pudiendo incrementar su tamaño un 10-30% (Dengate, 1984). El fenómeno de gelatinización (Figura 1.4.b) ocurre si a esta suspensión se la calienta, es irreversible y lo que sucede es que se pierde el orden molecular y el gránulo de almidón pierde la birrefringencia. La birrefringencia es un fenómeno óptico que presentan los gránulos de almidón cuando interaccionan con la luz polarizada y que permite evidenciar en el mismo una cruz de malta. El proceso de gelatinización se inicia en las zonas amorfas, por ser estas las que presentan enlaces de hidrógeno más lábiles, esto permite la entrada de agua al gránulo. Sumado a esto, se produce la disociación

de la doble hélice de moléculas de amilopectina, la fusión de las zonas cristalinas y la salida de moléculas de amilosa, todo esto ocasiona un incremento de la viscosidad de la suspensión. El proceso de retrogradación es la recristalización de la amilosa y la amilopectina (Figura 1.4.c), el mismo ocurre en el término de horas en el caso de la amilosa y es más lento, de días a semanas para la amilopectina. La retrogradación de la amilopectina ocurre en los gránulos gelatinizados o en los remanentes.



**Figura 1.4.** Cambios que experimenta el gránulo de almidón en una mezcla almidón–agua durante un calentamiento, enfriamiento y almacenamiento. a) Almidón nativo, b) Gelatinización y gelación, c) Almidón retrogradado (Fuente: Salinas, 2013).

#### 4.2.5. Proteínas

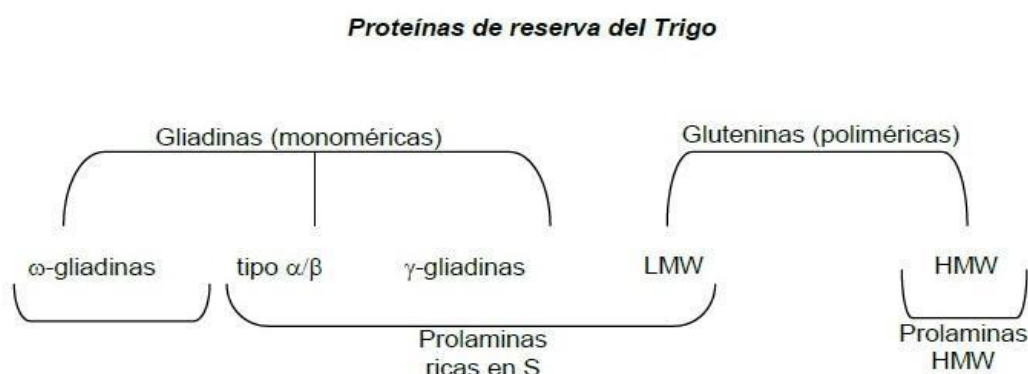
Como en otros cereales, las proteínas de la harina de trigo se clasifican en base a su solubilidad, según la secuencia de Osborne (1924) así pueden ser solubles en: agua (albúminas), solución salina diluida (globulinas), etanol (prolaminas) y solución diluida de ácidos o álcalis (glutelinas). Existe una fracción importante de proteínas que no son extraíbles por ninguno de los disolventes utilizados, por lo que se excluyen de la clasificación de Osborne.

Por otro lado, según la funcionalidad, pueden clasificarse en dos grupos:

- Proteínas no pertenecientes al gluten: representan entre un 15-20 % del total de las proteínas del trigo (albúminas y globulinas de Osborne). En su mayor parte son proteínas monoméricas, estructurales o fisiológicamente activas (enzimas).
- Proteínas de gluten: son las proteínas de reserva del grano de trigo (gliadinas y gluteninas) y constituyen entre el 80 y el 85% de las proteínas totales. Se denominan así porque son las que constituyen el gluten, el cual se define como una red viscoelástica que se forma cuando estas proteínas se hidratan durante el amasado. En la Figura 1.5 podemos observar la clasificación de



estas proteínas de reserva del trigo en base a peso molecular y al contenido de aminoácidos azufrados que son los responsables de las uniones disulfuro.



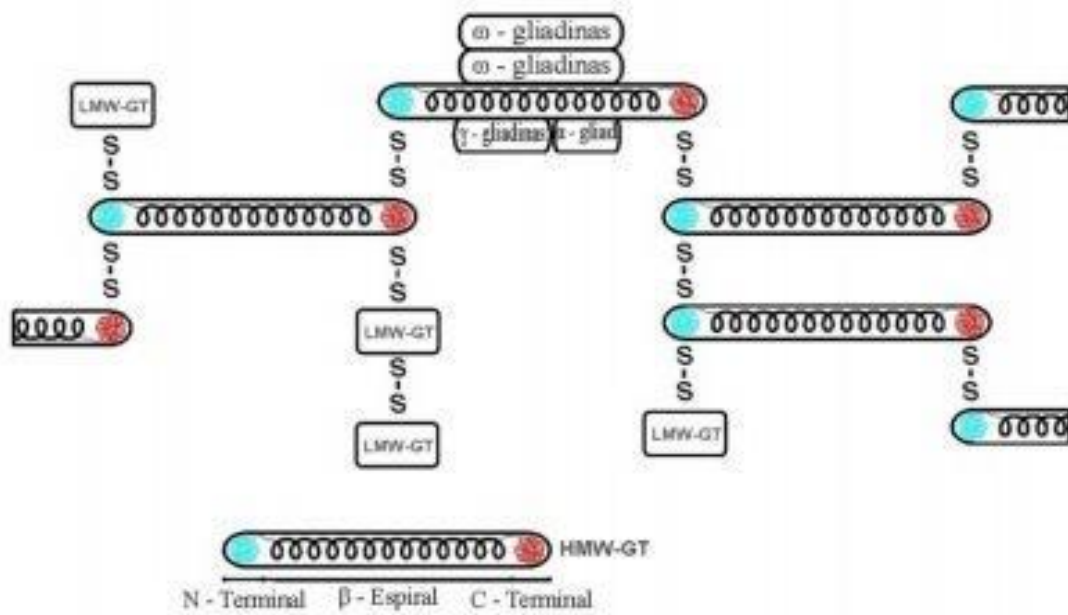
**Figura 1.5.** Esquema de clasificación de proteínas de reserva del Trigo (Shewry y col., 1986).

Las **gliadinas** presentan masas moleculares pequeñas que oscilan alrededor de unos 50 kDa, son de cadena simple y serían las responsables de la viscosidad de la masa (Belton, 2003; He y col., 2005; Wieser, 2007). Las gliadinas se clasifican en  $\omega$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ -gliadinas en relación con su movilidad electroforética, siendo las primeras las de mayor masa molecular, oscilando entre 50 y 65 kDa. Estudios posteriores permitieron comprender más acabadamente su composición y se pudo agrupar a las prolaminas de acuerdo a su relación con el azufre (Shewry y col., 1986) (Figura 5).

Las **gluteninas** son un grupo heterogéneo de proteínas, cuyo peso molecular oscila entre unos 100.000 y varios millones, con un promedio de unos 3 millones (Arfvidsson y col., 2004). Las gluteninas están compuestas por subunidades de alto (HMW) y bajo peso molecular (LMW) (D'Ovidio y Masci, 2004; Belton, 2003) asociadas por puentes disulfuro. El entrecruzamiento de las gluteninas por medio de estas uniones S-S contribuye a la estructura del gluten y por ende a la textura y reología de la masa (Belton, 2003; Wieser, 2007). Las subunidades de gluteninas de bajo peso molecular juegan un rol crucial en la determinación del uso final de la harina de trigo puesto que influyen en las propiedades viscoelásticas de la masa. Se pueden caracterizar por diferentes métodos que presentan ventajas y desventajas desde el punto de vista de costos, tiempos de demora, entre otros. Dentro de estos métodos se encuentran: SDS-PAGE; 2-DE; MALDI TOF- MS y PCR (Liu y col., 2006).

### Estructura y calidad del gluten

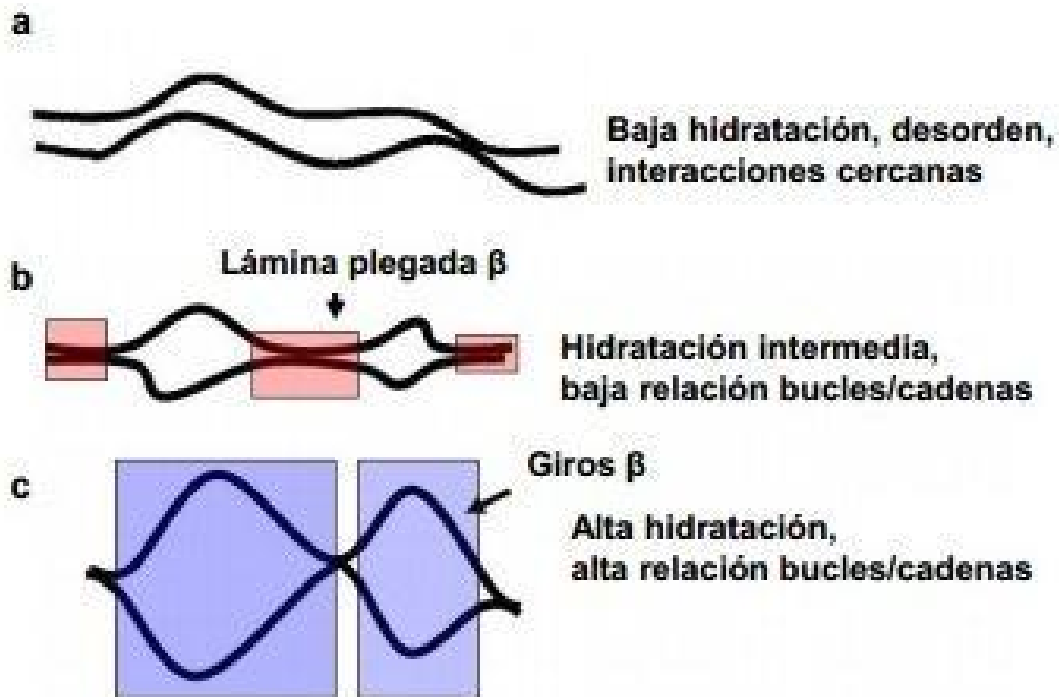
El gluten es una red compleja que está formado por dos tipos de proteínas: gliadinas y gluteninas. Ambas proteínas son insolubles en agua y forman el gluten luego del amasado de la harina de trigo con agua y del posterior lavado de la masa con una solución salina para eliminar las proteínas solubles (albúminas y globulinas) y el almidón. Una cierta cantidad de albúminas, globulinas y pentosanos puede permanecer después del lavado. Durante la formación de la masa, las interacciones de tipo covalentes (enlaces disulfuro) y no-covalentes (iónicas, hidrofóbicas puente hidrógeno) entre los polipéptidos más grandes de gluteninas producen una matriz elástica y extensible (Ng y col., 1991). Aproximadamente la mitad de los aminoácidos de las proteínas formadoras del gluten son la glutamina y la prolina, por lo tanto, existe una gran cantidad de enlaces puente hidrógeno estabilizando la red. Además, son importantes las interacciones hidrofóbicas debido a que el 35% de los aminoácidos poseen cadenas laterales de naturaleza hidrofóbica (Hoseney, 1994b). La Figura 1.6 muestra el esquema de la estructura del gluten presentado por Shewry y col. (2001), en el cual las subunidades de alta masa molecular-HMW forman la columna vertebral del polímero, y se encuentran unidas entre sí a través de puentes disulfuro intermoleculares ubicados en los extremos. La columna vertebral de HMW sirve de base para que se unan a ella las subunidades de baja masa molecular (LMW) mediante puentes disulfuro en los puntos de ramificación. Las gliadinas interactúan principalmente con los polímeros de gluteninas mediante interacciones no-covalentes. En el dominio central de las HMW-GT se establecen probablemente puentes de hidrógeno entre los grupos amida de los residuos de glutamina. Todas estas interacciones son muy importantes porque contribuyen a la viscoelasticidad de la masa (Belton, 1999 y Wang, 2003).



**Figura 1.6.** Esquema general de la estructura de la red de gluten. HMW: subunidades de gluteninas de alta masa molecular. LMW: subunidades de gluteninas de baja masa molecular. (Adaptado de Shewry y col., 2001). Dibujo: Analia Gómez.

Un modelo simple ampliamente utilizado en los últimos 20 años para describir la estructura del gluten es el de Belton (1999) en el que debido al gran tamaño que poseen, se ha sugerido que los polímeros de gluteninas forman la red continua que provee fuerza y elasticidad a la masa, mientras que los monómeros de gliadinas aportan plasticidad y viscosidad. Una de las primeras hipótesis más aceptadas para explicar la elasticidad del gluten, propuso que esta propiedad es consecuencia de la extensa cantidad de puentes de hidrógeno que unen a las estructuras giros-β formando estructuras β-espirales, que pueden extenderse actuando como resortes (Tatham y col., 1985). Belton (1999) describió al gluten como un sistema formado por una estructura de bucles y colas, “loop and train”, regiones donde existen interacciones polímero-solvente (loop) y regiones con interacciones polímero-polímero (train). En este modelo las gluteninas HMW inicialmente presentan una conformación en forma de bucle (loop) que son extendidas durante la extensión del gluten para formar polímeros alineados en los que se favorece la formación de altas proporciones de estructuras secundarias hoja plegada. El estiramiento de los polímeros produce primero la deformación de los bucles (loops) y posteriormente de las colas (train), a la vez que se disocian interacciones no-covalentes (Figura 1.7). Sin embargo, puede producirse la restauración del equilibrio de bucles y colas, lo cual resulta en la relajación de la estructura del polímero. La fuerza de restauración consistirá de un término entrópico asociado con la entropía conformacional de los

bucles y con la entalpía de formación de puentes hidrógenos en las colas, la pérdida de entropía resultante de la formación de estos enlaces será compensada, en parte, por el aumento de entropía del agua liberada que se encontraba ligada por enlaces hidrógeno.



**Figura 1.7.** Deformación de los polímeros causada por la extensión de la red proteica. a) Configuración de equilibrio. b) Pequeña extensión de la red, sólo las regiones de bucles son deformadas. c) Gran extensión de la red, las regiones de bucles son aplastadas y los puentes hidrógeno se rompen lo cual permite que las cadenas se deslicen unas sobre otras (Adaptado de Belton, 1999).

Esta red de gluten, descrita anteriormente y formada por las gliadinas y gluteninas capaces de absorber gran cantidad de agua, resulta en una matriz deformable, elástica y extensible que puede retener el dióxido de carbono generado durante la fermentación. Durante el amasado, además de las interacciones proteína-agua, se producen otras con componentes de la harina tales como: almidón, arabinoxilanos y lípidos (fosfo y glicolípidos) (Bettge y Morris, 2000; Lee y col., 2001).

Estas interacciones son las que permiten obtener la red viscoelástica capaz de formar, tras la cocción, el producto con características únicas como son los panificados. Existen dos factores que determinan la calidad del gluten para la elaboración de pan: la relación gliadinas/gluteninas y la calidad de las gluteninas. Cada una de estas fracciones cumple, como mencionamos anteriormente, diferentes roles en la masa: las gluteninas otorgan resistencia a la deformación y

elasticidad mientras que las gliadinas actúan como plastificantes contribuyendo a la plasticidad y viscosidad (Belton, 1999 y 2003). Una harina con buena aptitud panadera sería aquella en la cual exista un balance adecuado entre viscosidad y elasticidad. Se ha visto que es la fracción correspondiente a las gluteninas la que presenta mayor influencia en la calidad panadera, debido a que variaciones cualitativas y/o cuantitativas en sus subunidades ocasionan cambios en la misma (Ng y Bushuk, 1988; Khan y col., 2002). Las variaciones en la composición de las subunidades pueden dar lugar a diferentes interacciones covalentes que son las que determinan la elasticidad de las mismas y, a su vez, a diferentes estructuras poliméricas lo cual puede afectar su funcionalidad en el proceso de panificación. Otro punto importante es el grado de polimerización ya que sólo las proteínas que superan un determinado tamaño podrán contribuir a la elasticidad (Singh y MacRitchie, 2001).

## **5- PROCESO DE PANIFICACIÓN**

El pan es uno de los alimentos procesados más antiguo consumido por la humanidad. Se obtiene a través del proceso de panificación, en el cual se busca obtener un producto esponjoso y apetitoso a partir de la harina de trigo (Dewettinck y col., 2008).

La elaboración del pan es posible debido a la capacidad que tiene la harina de trigo para formar una masa viscoelástica, determinada como ya mencionamos por las características de las proteínas de gluten. Las diferencias principales entre las distintas formas de panificación se encuentran en la mezcla, amasado, incorporación de aire, formación y desarrollo del gluten. La calidad del producto puede verse modificada en la subdivisión de la masa y en las etapas del proceso que afectan a las piezas individuales, aunque dicha calidad se genere durante el desarrollo de la masa. La capacidad de retención de burbujas de gas por parte de la masa de pan, generadas durante la fermentación y horneado, es la responsable del desarrollo óptimo de la masa. La obtención de masas extensibles hace posible mejorar la retención de gas y, además, la reducción de la resistencia y elasticidad son importantes en la modificación de la estructura de las burbujas durante el proceso (Cauvain, 2002), que son las que en definitiva le darán el alveolado característico a la miga del pan.

### **5.1. Amasado y Fermentación**

Durante el amasado la presencia de agua, harina de trigo y la realización de un trabajo mecánico permiten la hidratación de gliadinas y gluteninas y se produce el desarrollo de una red viscoelástica

denominada gluten. El tiempo de amasado y las propiedades reológicas de la masa van a depender fundamentalmente de la cantidad y calidad de las proteínas formadoras del gluten.

Además, durante el amasado, los gránulos de almidón dañados generados durante la molienda, van a tener la capacidad de absorber hasta un 40% del agua (Stauffer, 1998 y Stauffer, 2007) y actuarían como relleno en la matriz de la masa contribuyendo a aumentar su viscoelasticidad. En la harina de trigo es aceptable hasta un 15% de gránulos de almidón dañados ya que absorben hasta 4 veces más agua que los gránulos intactos y en la etapa de fermentación son más susceptibles a la acción de la enzima  $\alpha$ -amilasa, ya que a partir de su hidrólisis se forma glucosa que sirve de sustrato para las levaduras (Howitt y col., 2003 y Hajšelová, 2003).

En el amasado, los lípidos que se encuentran libres pueden interaccionar uniéndose al gluten o a la superficie de los gránulos de almidón, mientras que los lípidos combinados con la amilosa no están disponibles, y por lo tanto no afectan este proceso. Los lípidos polares tienen influencia en el comportamiento del pan durante el horneado y aumentan la retención de gas estabilizando los alvéolos de la miga, lo cual repercute en el volumen de la pieza de pan. La formación de una monocapa lipídica en la interfase gas/líquido de la masa brinda una mayor estabilidad (Sroan y col., 2009) e influye en las propiedades viscoelásticas de la misma (Belton, 2003).

El color de la miga y las propiedades reológicas pueden verse afectadas por los ácidos grasos poliinsaturados cuando éstos son oxidados por enzimas lipooxigenasas presentes en la harina, dando lugar a radicales libres e hidroperóxidos que pueden oxidar a carotenoides y proteínas (Chung y col., 1978).

La consistencia de la masa es muy importante, ya que define la forma en que los gases generados durante la fermentación interaccionan con la fase acuosa y la matriz para producir las burbujas de aire que serán finalmente los alvéolos de la miga del pan.

Cuando la masa está formada, las proteínas del gluten se reorientan mediante el proceso de laminación, esto también permite mejorar la extensibilidad de la masa. Luego la masa se deja en reposo para permitir que se relaje antes de ser moldeada, lo que se busca es obtener una masa elástica y moldeable a la vez. Durante esta etapa se generan sustancias que contribuyen al aroma y sabor de la masa.

Finalizado el reposo, la masa debe dividirse en piezas, en este momento la red de gluten es dañada, por lo que luego son sometidas a un proceso de boleado para restaurar el daño producido. A estas etapas suele seguirle otro tiempo de reposo durante el cual se continúan modificando las propiedades físicas y químicas de la masa. Luego se arman las piezas adquiriendo la forma del pan.

El efecto que tienen los arabinosidos sobre la panificación aún muestra resultados contradictorios. Mientras que se sabe que los pentosanos solubles en agua influyen en la viscoelasticidad de la masa, los insolubles aumentan la consistencia y dureza de la misma, disminuyendo estos últimos el tiempo de desarrollo y aumentando la resistencia a la extensión (Michniewicz y col., 1990; Wang y col., 2002).

En el caso de los panificados libres de trigo pan y, por lo tanto, en ausencia de gluten lo que se obtienen son mezclas viscosas, masas batidas de consistencias semilíquidas. En el caso de que se formen masas en sistemas libres de gluten, éstas son menos cohesivas y elásticas que las masas provenientes del trigo, presentan textura disgregable, son más pegajosas y difíciles de manipular (Serrano Fuster, 2016). Actualmente, aunque la industria de alimentos asume los desafíos asociados a la eliminación del gluten en las formulaciones, la calidad tecnológica y nutricional de los productos es todavía deficiente (Mariotti y col, 2013).

Pasando al proceso de fermentación, este tiene el objetivo de permitir que la masa de trigo ya moldeada se relaje y expanda para que se forme una pieza aireada de masa que, cuando se hornee, tenga la forma y el volumen requeridos. El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) producido por la fermentación alcohólica de las levaduras presenta alta solubilidad, por lo que queda retenido en la fase acuosa y cuando ésta se satura pasa a los alvéolos (Maloney y Foy, 2003). Además, en la masa quedan atrapados durante el amasado oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). El  $\text{O}_2$  se agota rápidamente porque es consumido por las levaduras y el  $\text{N}_2$  es importante ya que proporciona el núcleo de la burbuja a cuyo interior puede difundir el  $\text{CO}_2$  cuando abandona la solución. El número y tamaño de las burbujas de gas disponibles en la masa al final del amasado se encuentran influenciados por: el método de formación de masa que se emplee, las condiciones del amasado y el adecuado balance entre el flujo viscoso y la fuerza elástica (dependiente de las características del gluten).

En la fermentación, como mencionamos anteriormente, también se producen cambios en la composición de la matriz debido a los productos del metabolismo de las levaduras formados durante la misma (azúcares, etanol,  $\text{CO}_2$ , entre otros) por la acción de las proteasas y amilasas de la harina, y en el caso de que los hubiera, por la acción de los aditivos. Durante esta etapa la red de gluten sigue experimentando cambios, disminuye su adhesividad y extensibilidad, pero se hace más elástica, y es determinante para la retención del gas formado durante la misma (Hoseney y Rogers, 1990) y en la etapa inicial del horneado, lo cual determina el volumen del pan y la estructura de la miga.

## 5.2. Horneado

En esta etapa, se transforma la masa en una pieza de pan. Para esto se aplica calor, lo cual ocasiona la rápida expansión del gas en la masa, la eliminación de parte de agua, la gelatinización del almidón y la agregación de las proteínas. En general, en esta etapa se utilizan temperaturas de 190-210°C entre 10 y 15 min, dependiendo del horno y de la formulación.

En los primeros minutos del horneado (antes de que se inactiven las levaduras) la masa continúa expandiéndose producto de la gran cantidad de CO<sub>2</sub> generado y el gluten debe tener la capacidad de retener el gas que se está produciendo (Maloney y Foy, 2003).

En el horneado queda determinada la estructura alveolar de la miga y se define el volumen alcanzado por el pan (Eliasson, 2003). Esto es debido a que existen varios cambios a la vez en las proteínas: cambia la hidrofobicidad superficial, se produce un intercambio de puentes disulfuro y formación de nuevos enlaces disulfuro (Weegels y col., 1994) y también ocurre la gelatinización del almidón.

Una vez horneado, es importante que la pieza de pan se enfríe, esto es especialmente importante en el caso de aquellos que se envasan en rodajas para evitar que se rompan y que crezcan mohos (Pateras, 1998). Sumado a esto, la pérdida excesiva de humedad debe evitarse porque constituye una pérdida económica además de que acelerará el envejecimiento del pan.

A nivel industrial, luego vendría el envasado del producto. Comúnmente se realiza en bolsas de polietileno de baja densidad. Constituye una buena barrera frente al vapor de agua por lo que se previene la deshidratación, a la vez permite al consumidor ver el producto que está comprando.

A pesar del envase utilizado, durante el almacenamiento el pan experimenta diversos cambios que van en detrimento de su calidad, proceso que se denomina envejecimiento y que se describe a continuación.

## 5.3. Vida útil: envejecimiento del pan

El pan fresco posee una corta vida útil, ya que durante el almacenamiento ocurren distintos cambios físicos y químicos conocidos como envejecimiento del pan, este proceso comienza, cuando el pan sale del horno. El envejecimiento del pan es el conjunto de cambios físico-químicos que llevan a la pérdida de la calidad del pan durante el almacenamiento. Durante este período, el almidón es el mayor responsable del endurecimiento del pan debido al fenómeno de retrogradación (Pateras, 1998). Algunos autores postulan que durante el envejecimiento del pan los pentosanos tendrían un efecto positivo ya que debido a un efecto estérico interferirían con la



asociación intermolecular de la amilosa y la amilopectina (Kim y D' Appolonia, 1977a y b). El rol del gluten en el envejecimiento del pan no es claro, aunque se ha encontrado que forma enlaces de hidrógeno con el almidón gelatinizado (Martin y Hosenev, 1991).

Durante este proceso, se endurece la miga, hay pérdida de cohesividad y se pierde el aroma característico a pan recién horneado, entre otros cambios.

El almidón es el componente del pan que tiene el papel más importante durante los cambios que se producen en el envejecimiento. Se produce una reorganización de las moléculas de almidón y se recupera cierta cristalinidad, pérdida previamente durante el horneado debido a la gelatinización (Atwell, 1988; Gray y Bemiller, 2003; Rodriguez-Sandoval y col., 2005).

La amilosa gelifica rápidamente luego de obtener el producto y recristaliza parcialmente durante las primeras horas formando dobles hélices. En esta etapa también ocurre la cristalización parcial de cadenas cortas de amilopectinas. En los días siguientes, se produce la recristalización de la amilopectina que se encuentra en los gránulos de almidón, provocando una pérdida en la retención de agua de la miga y por lo tanto promoviendo la migración de la misma hacia el entorno (Kim y D'Appolonia, 1977 b; Morad y D'Appolonia, 1980; Miles y col., 1985 y Rodriguez-Sandoval y col., 2005). En la Figura 1.8 se pueden observar, esquematizados, los procesos de gelatinización y retrogradación del almidón.



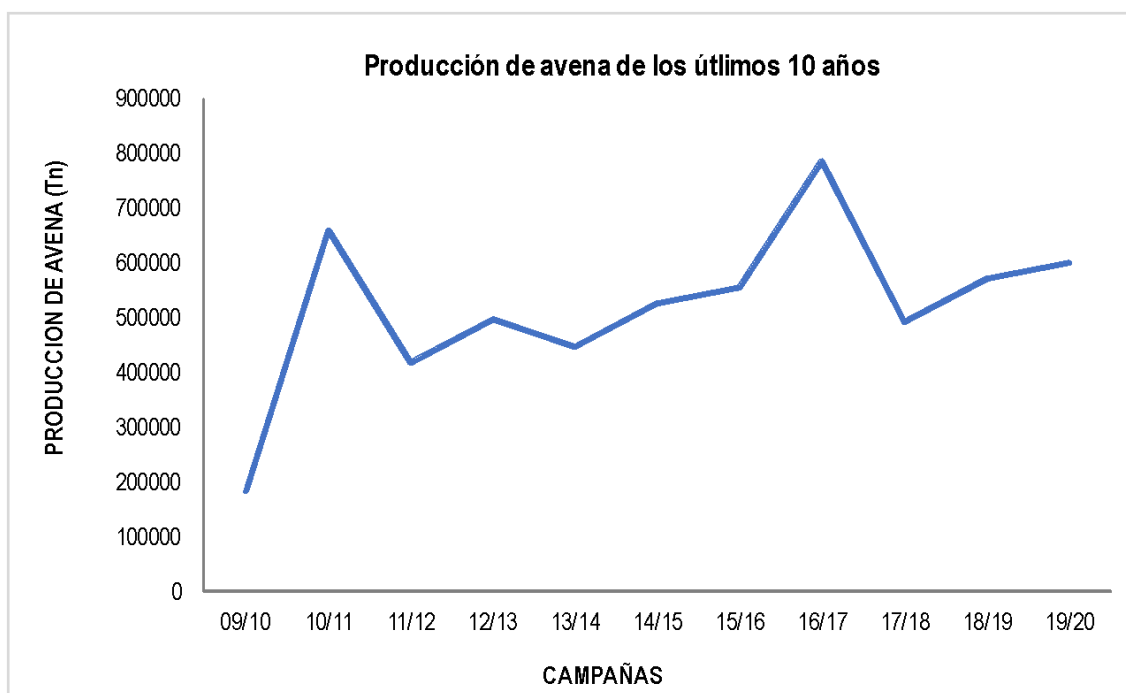
**Figura 1.8.** Gelatinización y retrogradación del almidón (Fuente: Bigne, 2016).

Además del endurecimiento, la miga pierde elasticidad y la corteza se ablanda. Estos cambios se deben a la migración del agua desde la miga hacia la superficie y a la retrogradación de amilopectina (Czuchajowska y Pomeranz, 1989; He y Hosenev, 1990; Piazza y Masi, 1995; Baik y Chinachoti, 2000; Hug-Iten y col., 2003 y Gray y Bemiller, 2003).

## 6- AVENA

La avena (*Avena sativa* L.) es un cereal que se cultiva en todo el mundo para alimentación humana y animal. Comparado con otros cultivos, se dice que la avena es más adecuada para la producción en ambientes marginales, incluyendo climas fríos, húmedos y suelos con baja fertilidad (Hoffmann, 1995). Las principales áreas de cultivo de avena se encuentran entre las latitudes de 40° y 60° norte de América, Europa y Asia; una pequeña proporción de la producción mundial de avena se origina en el hemisferio sur, es decir, Sudamérica, Australia y Nueva Zelanda (Buerstmayr y col., 2007).

La Argentina ocupa el puesto número 10 (diez) en la producción mundial de avena, en la campaña 2019/20 se produjeron 600.105 Tn (Figura 1.9).



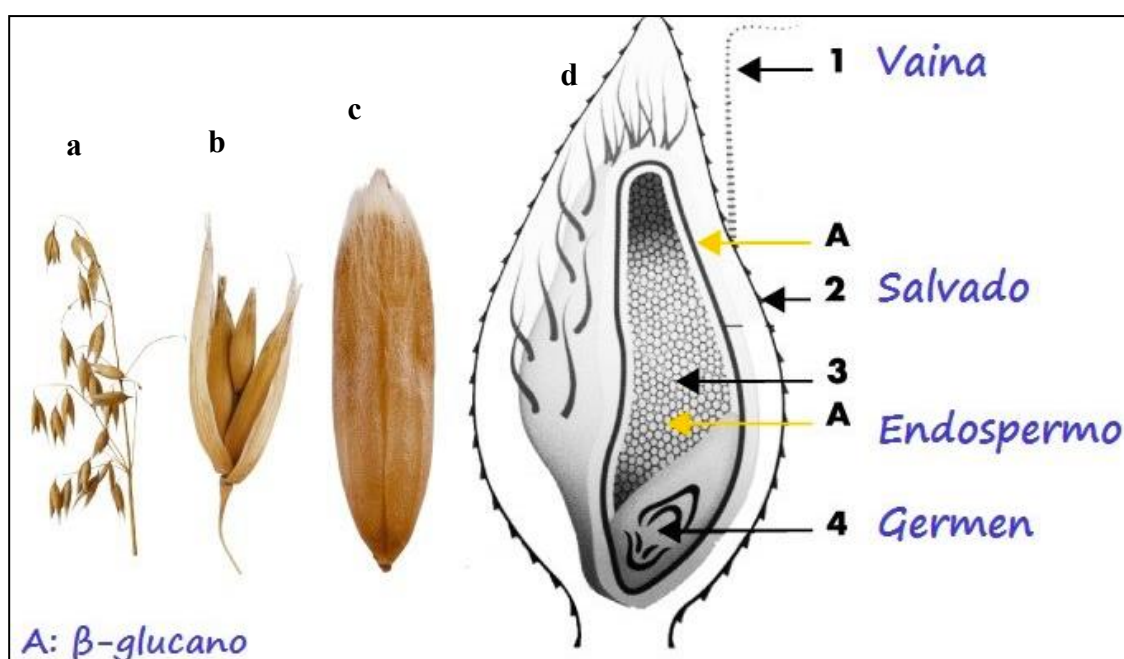
**Figura 1.9.** Producción de Avena en Argentina en los últimos 10 años. Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2020.

Tradicionalmente, la avena ha sido utilizada en alimentación animal (Andersson y Börjesdotter, 2011; Marshall y col., 2013), solo el 10% de la avena producida se utiliza para consumo humano (Andersson y Börjesdotter, 2011). Actualmente, el grano de avena y sus derivados pertenecen a un grupo de alimentos modernos, saludables y funcionales. La gente, en especial de los países desarrollados, consumen avena de distintas formas: pasta, pan, panecillos, galletas, pasteles, entre otros (Andersson y Börjesdotter, 2011). Este consumo se ha producido por los efectos

benéficos que posee este grano, por ejemplo, debido al contenido de  $\beta$ -glucanos, compuestos que mejoran el sistema cardiovascular, reduciendo el nivel de colesterol en la sangre (Ryan y col., 2007). La avena es una excelente fuente de proteínas, lípidos, vitaminas, minerales y antioxidantes (Peterson, 2001). La composición única del grano de avena provocó un aumento en el interés de las industrias de alimentos, productos farmacéuticos y cosméticos (Marshall y col., 2013; Boczkowska y Onysk, 2016).

### 6.1. Estructura y composición del grano de avena

En la Figura 1.10 se puede observar: (a) una panoja de avena, (b) la disposición de los granos en la espiguilla y (c) el grano. En la Figura 1.10 d se muestra el corte transversal del grano, podemos observar: vaina, el salvado, el endosperma y el germen, los puntos marcados con la letra "A" corresponden a la ubicación de los  $\beta$ -glucanos, constituyentes de gran importancia nutricional que serán explicados a continuación.



**Figura 1.10.** Estructuras de la planta de avena: a) panoja, b) granos de espiguillas, c) granos y d) corte transversal del grano de avena con el detalle de sus constituyentes. A: lugares donde se encuentran los  $\beta$ -glucanos. Fuente: Enciclopedia Británica, 1996.

En la Tabla 1.4 se puede observar la composición de los granos de avena enteros y descascarados. El rango de variación evidenciado en cada componente se debe a las distintas variedades existentes, en el grano entero esa variabilidad es aún mayor debido a la existencia de

las cubiertas seminales (Sterna y col., 2016). Tanto las vitaminas como los minerales se pierden al quitar la cubierta de las semillas, la composición mineral de la avena es similar a la de los demás cereales (Peterson, 1998). Sterna y colaboradores en 2016, consideraron que el contenido de proteínas y lípidos era elevado en el grano de avena y, estudiaron la composición de los mismos. Así, determinaron que la composición de aminoácidos, con diferencias entre variedades, se encontraba cercana al óptimo para la alimentación humana. En el caso de los lípidos, destacaron que entre el 78-81,5% de los mismos estaban constituidos por ácidos grasos insaturados, los cuales resultan de gran interés para la salud humana.

El almidón de la avena no ha sido de interés para la industria química pues su separación de los demás componentes no es sencilla; se encuentra en gránulos pequeños (3 a 10  $\mu\text{m}$ ) y de forma irregular (a menudo poliédricos, pero a veces ovoides o hemisféricos), tienden a existir en racimos y no caen en distribuciones de tamaño discretas, como en el trigo y la cebada. El almidón es el componente más abundante del grano de avena. La gelatinización de los almidones es similar a la de los demás cereales, pero la mayoría de los cultivares presentan almidones con alta susceptibilidad a la ruptura y se comportan como almidones blandos (tipo waxy) (Zhou y col., 1998).

La fibra dietaria, presente en el grano entero entre un 13-30%, será tratada con detalle a continuación.

**Tabla 1.4.** Composición química del grano de avena entero y descascarado.

<b>Componente</b>	<b>Grano entero</b>	<b>Grano descascarado</b>
Proteínas (%)	9,70-17,30	9,91-11,25
Lípidos (%)	5,20-12,40	4,96-5,34
Almidón (%)	27,30-50,01	47,79-48,37
Vitamina E (mg/Kg)	4,50-12,30	5,44-10,16
Fibra dietaria total (%)	13,66-30,17	16,11-16,15

*Fuente:* Sterna y col., 2016

## 6.2. Fibra dietaria y $\beta$ -glucanos del grano de avena

Los granos de avena han sido reconocidos como alimentos funcionales porque proporcionan un efecto beneficioso sobre la salud del consumidor y disminuyen el riesgo de desarrollar diversas enfermedades crónicas no transmisibles. Los valiosos atributos fisiológicos y nutricionales de la avena se deben a los  $\beta$ -glucanos y otros componentes de la fibra dietaria, el alto nivel de tocoferol

y el nivel de antioxidantes naturales que han generado una mayor demanda de la avena para la nutrición humana (Zwer, 2004). La actividad de la vitamina E es proporcionada por los tocoferoles y tocotrienoles, que en conjunto constituyen los tocoles. El  $\alpha$ -tocoferol es un componente antioxidante importante presente en la avena cruda inalterada cuando se extrae el lípido (Zielinski y col., 2001). Adicionalmente, y como fue mencionado anteriormente, la avena contiene ácidos grasos insaturados, conocidos por reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares, así como también el desarrollo de ciertos tipos de cánceres (colon, mama, próstata) y de la ocurrencia de enfermedades de tipo inflamatorias (Lunn y Theobald, 2006). Los beneficios en el consumo de fibra dietaria proveniente de los cereales ha incrementado el interés en la fibra de la avena. La fibra dietaria está compuesta por dos fracciones una insoluble en agua y otra soluble en agua. La fracción soluble está compuesta por polisacáridos no almidonosos tales como los  $\beta$ -glucanos y los arabinosilanos; estos compuestos son capaces de formar soluciones viscosas y, el incremento de la viscosidad a nivel intestinal hace más lento el tránsito intestinal, retrasa el vaciado gástrico y enlentece la absorción de glucosa y esteroides en el intestino. Esta fracción también puede reducir el colesterol sérico, la glucosa en sangre posprandial y los niveles de insulina. La fibra dietaria insoluble está compuesta por lignina y polisacáridos no almidonosos. La lignina no es un polisacárido, pero es un polímero fenólico lipofílico que puede absorber ácidos biliares. Las fibras dietarias insolubles suelen tener una alta capacidad de retención de agua, lo que contribuye a aumentar la masa fecal (Manthey y col., 1999). En la Tabla 1.5 se puede observar la composición de la fibra de avena (promedio de diferentes genotipos, según Manthey y col., 1999). Además de estos beneficios nutricionales, la fibra de avena contribuye a las propiedades estructurales a los alimentos, modificando su comportamiento reológico. Cuando se agregan ingredientes de alta afinidad al agua a una formulación (como la fibra dietética), el agua se redistribuye, generando cambios en las propiedades reológicas de la masa y alterando la ubicación del agua dentro de la matriz. Se encontró que la incorporación de fibra de avena cambia sustancialmente el perfil de pérdida de agua de la masa, dejando menos agua disponible para la hidratación de los gránulos de almidón de la harina de trigo (Blanco Canalis y col., 2019).

**Tabla 1.5.** Composición de la fibra dietaria del grano de avena. Valores expresados en % de masa seca.

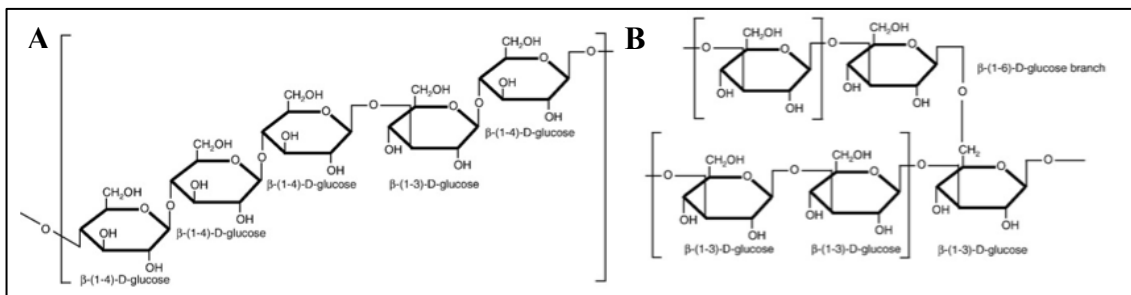
Grano de avena	Fibra dietaria			$\beta$ -Glucanos
	Soluble	Insoluble	Total	
	4,1-4,9	6,0-7,1	10,2-12,1	4,0-4,8

Fuente: Manthey y col., 1999.

Se demostró que la fibra dietaria contribuye a la prevención de enfermedades cardíacas, diabetes, algunas formas de cáncer y a la mejora de las funciones de la memoria a corto y largo plazo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una ingesta de fibra dietaria de al menos 25 a 35 g/día. En Estados Unidos, la ingesta promedio es sólo de 12-18 g/día y en Europa es de entre 15-20 g/día; sin embargo en África, debido a una dieta rica en hidratos de carbono, se supera dicho umbral con valores entre 40 a 60 g/día. Una de las consecuencias del bajo consumo de fibra dietaria es la obesidad (Sterna y col., 2016).

### Beta-glucanos

Los  $\beta$ -glucanos son polisacáridos no digeribles de origen natural que se encuentran en diferentes fuentes orgánicas, tales como los granos de maíz, levaduras, bacterias, algas, entre otros. Son importantes componentes de las fibras y contienen polisacáridos no ramificados que consisten en unidades de  $\beta$ -D-glucosa unidos a través de enlaces glicosídicos (1 $\rightarrow$ 4) y (1 $\rightarrow$ 3) en cereales y enlaces glicosídicos (1 $\rightarrow$ 6) en fuentes fúngicas (Figura 1.11). Los glucanos están concentrados generalmente en el salvado, en las capas de aleurona y sub-aleurona (Charalampopoulos y col, 2002). El mayor contenido de  $\beta$ -glucanos se encuentra en los granos de cebada y avena, en comparación con otros cereales/pseudocereales como trigo, arroz, trigo sarraceno, mijo y amaranto (Havrlentová y col, 2011). Se han evidenciado mejoras nutricionales asociadas a los beneficios que tiene la incorporación de  $\beta$ -glucanos en la dieta, entre éstas se menciona: reducción del colesterol, control glucémico, efectos positivos en el sistema cardiovascular, efecto antitumoral e inmunomodulador (Brennan y Cleary, 2005; Collar, 2006; Havrlentová y col, 2011). También se ha citado a los  $\beta$ -glucanos como los compuestos activos de la fibra dietaria soluble responsables de jugar un rol fundamental en la fisiología intestinal, debido a los efectos prebióticos (Vasiljevic y col, 2007).



**Figura 1.11.** Estructura de los  $\beta$ -glucanos en: A). Cereales y B). Levaduras. Fuente: Volman y col., 2008.

### 6.3. Procesamiento y molienda de avena

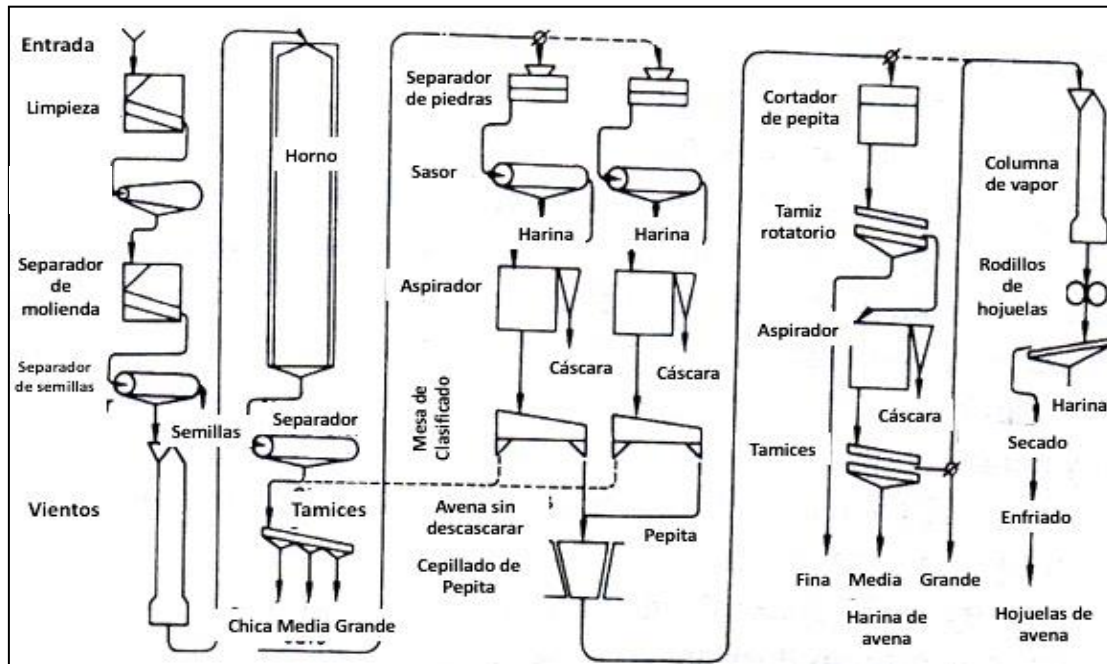
La molienda de la avena difiere de la de trigo debido a diferencias en la estructura anatómica y en la composición química del grano, así como también por el producto final que se desea obtener. Las diferencias más importantes en la composición química de estos granos, y que hacen que el procesamiento sea diferente, son:

- La cubierta externa del grano de avena. Debe ser removida antes del procesamiento debido a que no puede ser consumida por el hombre. Solo entra a procesamiento la pepita del grano.
- El contenido de lípidos en la avena es de 2 a 5 veces mayor que el del grano de trigo. A su vez, contiene enzimas lipasas que degradan esos lípidos favoreciendo el enranciamiento del producto procesado. Por lo que se deben inactivar previamente esas enzimas.
- El contenido de proteínas de la avena, aunque similar en cantidad al de trigo, no tiene la capacidad de formar gluten, por lo que no puede ser utilizada en la elaboración de un pan de buenas características organolépticas.

El salvado de avena es más liviano y de color más claro que el de trigo. El rendimiento molinero en la avena es mayor que en el caso del trigo (Kent, 1987; Weherhane, 2009).

### 6.4. Harina de avena

En la Figura 1.12 puede observarse el procesamiento de la avena para la obtención de harina y hojuelas. Los granos recibidos del campo se limpian, removiendo cuerpos extraños y granos de avena que sean indeseables (ejemplo: granos enfermos). Las máquinas de limpieza utilizadas son similares a las que se usan para trigo pan.



**Figura 1.12.** Diagrama de flujo de molinero de avena (Tomado y traducido de Kent, 1987).

Los granos de avena limpios pasan por el proceso de estabilización con el objetivo de inactivar la enzima lipasa. Las lipasas, presentes naturalmente en el grano de avena, están localizadas en su mayoría en el pericarpio del grano. Estas enzimas hidrolizan los lípidos dando como resultado los ácidos grasos libres que provocan el enranciamiento del producto. En el grano, los lípidos están distribuidos en todo el endosperma, germen y capa de aleurona, siendo éstas últimas las que mayor contenido presentan. Por lo que, en el grano entero de avena, las lipasas y los lípidos no están en contacto, evitándose así, el efecto de hidrólisis. Pero cuando la avena es sometida al proceso de molienda, las lipasas del pericarpio entran en contacto con los lípidos presentes en el endosperma, germen y capa de aleurona, y el proceso de formación de ácidos grasos libres se acelera, esto depende de la temperatura, contenido de humedad y de la granulometría de la molienda. El contenido de humedad es el parámetro más importante en lo que a esto respecta: la actividad lipasa en la harina de avena es baja cuando es almacenada con bajo contenido de humedad y temperatura, pero, por encima de 10% de humedad es apreciable.

Por lo mencionado anteriormente, la lipasa debe ser inactivada antes o durante el proceso de molienda con tratamientos térmicos realizados bajo condiciones controladas. El tratamiento térmico es más rápido con alto contenido de humedad que con bajo, y lo más efectivo es usar vapor de agua y luego secar la muestra; a este proceso se lo conoce como *estabilización* (Kent, 1987). Durante el *proceso de estabilización*, la avena con un contenido de humedad de 14-20%, llega rápidamente a una temperatura de entre 96-100°C por la inyección de vapor de agua a



presión atmosférica; esta temperatura se mantiene por 2-3 min controlando el caudal de vapor. Este proceso, además de inactivar lipasas, tiene un efecto benéfico en el desarrollo de aroma y en la resistencia al inicio de la rancidez oxidativa.

Luego de la estabilización se realiza el *proceso de cocción*. La avena se lleva a contenidos de humedad de entre 4-8%, este proceso ocurre a 60°C. Los objetivos de este paso son: reducir el contenido de humedad del producto a valores que sean seguros para su almacenamiento; facilitar la molienda incrementando la fragilidad de la cáscara y; desarrollar el aroma característico de la avena, descrito como “nuez”.

Luego sigue el *proceso de pelado*. En este caso, la avena pasa entre grandes piedras circulares, de las cuales una está fija y la otra gira. Ambas piedras tienen una separación un poco menor que el largo del grano, el rozamiento produce el descascarado. Es importante que esté bien calibrado y que el tamaño del grano sea lo más uniforme posible para lograr un buen rendimiento. La mezcla de pepita, cáscara y grano dañado se separa por corriente de aire. Los granos que no fueron descascarados vuelven al inicio.

*Pulido y corte*. Los granos pelados son sometidos a un cepillado que elimina el pelo que cubre la superficie de los mismos. En este punto parte de la pepita pasa al proceso de obtención de hojuelas o avena arrollada y otra parte pasa al proceso de corte donde son cortados transversalmente, cada pepita rinde entre 4 y 5 piezas, con un peso de partícula aproximado de 6 mg.

*Molienda*. Las piezas obtenidas anteriormente se muelen y tamizan. Por su granulometría, se separan en harina integral de avena y harina de avena. Para considerarse harina integral, esta debe pasar como mínimo un 60% la malla de 420 micrones; en el caso de la harina de avena, debe pasar como mínimo un 80% esa misma malla. El rendimiento promedio de harina de avena es de 57%.

En la Tabla 1.6 podemos observar la composición nutricional de los productos de molienda de la avena. En general, los parámetros de composición nutricional resultan similares en los tres productos de molienda. El contenido de proteínas es más elevado en la harina de avena. El contenido de cenizas y fibra es mayor en la harina integral, esto se debe a la presencia de minerales y fibra en las partes más externas del grano. Por último, el contenido de carbohidratos (distintos a la fibra) resulta más elevado en la harina integral.

**Tabla 1.6.** Composición química de los productos de molienda de avena. Humedad, proteínas, lípidos, cenizas, fibra dietaria total (FDT) y carbohidratos (diferentes a la fibra). Expresados en base seca.

<b>Material</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Proteínas (%)</b>	<b>Lípidos (%)</b>	<b>Cenizas (%)</b>	<b>FDT (%)</b>	<b>Carbohidratos (%)</b>
<b>Harina Integral</b>	8,8	11,8	6,8	1,9	1,1	68,4
<b>Hojuelas Avena</b>	10,1	12,0	6,8	1,8	0,9	67,2
<b>Harina Avena</b>	9,3	12,9	7,2	1,8	1,0	66,6

Fuente: Kent, 1987.

## **7- ENFERMEDADES RELACIONADAS AL CONSUMO DE CEREALES**

### 7.1. La avena y la enfermedad celíaca

La celiacía es una enfermedad que prevalece en un 1% en el mundo occidental (Kang y col., 2013; Lohi y col., 2007; Kosová y col., 2020). El único tratamiento eficaz para toda la vida consiste en el consumo de una dieta libre de gluten, esto resulta un problema grave en los países occidentales debido al uso del gluten como aditivo en la industria alimentaria y a la contaminación cruzada de los alimentos sin gluten. Ciertas proteínas que componen el gluten y están presentes en algunos cereales son las causantes de esta intolerancia. Las fracciones de proteína que forman el gluten son las prolaminas y gluteninas pero, la fracción soluble en alcohol (prolaminas), en trigo (gliadinas), en centeno (secalinas) y en cebada (hordeínas) son las que más preocupan a los individuos con enfermedad de celiacía (Dickey, 2008). En la avena esta prolamina se la conoce con el nombre de avenina (Garsed y Scott, 2007). Las aveninas de la avena (subgrupo *avenae*) son estructuralmente diferentes a la fracción prolamina del triticale y representan un 10-15% del total de las proteínas de la avena; en contraposición, en el subgrupo triticale (trigo, centeno y cebada) las prolaminas llegan a ocupar entre un 30 y un 50% del total (Butt y col., 2008).

Aunque las dietas libres de gluten otorgan beneficios a la salud para las personas que tienen diagnosticada esta enfermedad, en general son dietas con deficiencias nutricionales en vitaminas, calcio, hierro y fibra (Tye-Din y Anderson, 2008; Oxentenko y Murray, 2015). La avena representa una alternativa prometedora para las personas que padecen la enfermedad celíaca o cualquier otra forma de intolerancia al gluten, ya que las prolaminas aveninas específicas de la avena revelan un contenido de gluten e inmunorreactividad generalmente bajos (Kosová y col., 2020). Estudios recientes sobre la estructura molecular de las aveninas revelaron una gran variabilidad

genética en las secuencias de aveninas que afectan el espectro de péptidos del gluten producidos por las hidrolasas en el tracto digestivo humano. Diferentes estudios clínicos revelaron resultados contradictorios con respecto a la seguridad potencial de la avena para los pacientes con enfermedad celíaca, el enfoque debe dirigirse a la variabilidad genética en las aveninas de la avena. La identificación de isoformas de aveninas con inmunorreactividad mínima contra esta enfermedad, abrirá caminos que conduzcan al diseño de nuevos cultivares de avena adecuados para este tipo de pacientes. El conocimiento sobre la inmunorreactividad de los péptidos del gluten junto con la obtención de nuevos cultivares de avena que revelen una inmunorreactividad mínima o nula a las aveninas, así como la aplicación de tecnologías de procesamiento de alimentos que conduzcan a la reducción del contenido de gluten, deberían dar como resultado el desarrollo de variedades de avena sin gluten seguras para los celíacos (Fric y col., 2011; Comino y col., 2015). La mayoría de los celíacos pueden tolerar la avena sin ningún síntoma clínico (Cohen y col., 2019). En algunos países del mundo, la avena está incluida dentro de los ingredientes libres de gluten, esto se da en países en los cuales el límite es de 20 mg de gluten por 1 kg de alimento (20 ppm). Tal es el caso del Reglamento 41/2009 de la Comisión Europea (Kosová y col., 2020) aunque su seguridad para celíacos sigue siendo una materia de debate. En Canadá, la Asociación Canadiense de Celíacos, la Agencia Canadiense de Inspección de Alimentos y Salud canadiense recomendó el consumo de avena pura y no contaminada donde el contenido de gluten no exceda los 20 ppm detectado por la prueba R5-ELISA (Rashid y col., 2007). Por el contrario, la avena no se considera un "alimento sin gluten" en Australia y Nueva Zelanda (Kosová y col., 2020). Estados Unidos permite la venta de avena como alimento libre de gluten, cuidando la contaminación con otros cereales (trigo, cebada y centeno) de manera que no presente contenidos mayores a 20 ppm de gluten.

En nuestro país, el Código Alimentario Argentino (CAA) define, en el Capítulo XVII (Alimentos de Régimen o Dietéticos) Artículo 1383 (Resolución Conjunta SPR el N° 131/2011 y SAGyP N° 414/2011), que un "alimento libre de gluten" es aquel que está preparado únicamente con ingredientes que por su origen natural y por la aplicación de buenas prácticas de elaboración (que impidan la contaminación cruzada) no contiene prolaminas procedentes del trigo, centeno, cebada, avena ni de sus variedades cruzadas. El contenido de gluten no podrá superar el máximo de **10 mg/Kg**. Estos productos deberán ser rotulados con la denominación del producto que se trate, seguido de la indicación "libre de gluten" debiendo incluir además la leyenda "Sin TACC" en las proximidades de la denominación del producto con caracteres de buen realce, tamaño y visibilidad. De esta manera, vemos que el CAA tiene mayor restricción que las regulaciones de los países

citadas anteriormente, en cuanto al contenido máximo de gluten permitido en un alimento para celíacos y que excluye totalmente la presencia de avena en la dieta libre de gluten.

En Canadá, La Vieille y col. en 2016 publicaron una exhaustiva revisión bibliográfica de ensayos clínicos realizados con adultos y niños celíacos donde revelaron resultados contradictorios. Por un lado, concluyeron que no había evidencias de que la avena (libre de contaminación con trigo, cebada y centeno) debería limitarse en la dieta libre de gluten pero, por el otro lado, advirtieron que la incorporación de avena, en la dieta puede generar algún tipo de irritación a nivel intestinal debido a los altos contenidos de fibra presentes en este grano.

Dentro de los ensayos realizados en adultos, Kaukinen y col. (2013) no encontraron aumento en los niveles de linfocitos intraepiteliales de la mucosa del intestino delgado, ni daño de las vellosidades de la mucosa del intestino delgado, ni inflamación cuando un grupo de pacientes adultos con la enfermedad consumían 20 g de avena por día durante un máximo de ocho años. En este caso, el consumo diario de avena tuvo efectos beneficiosos ya que proporcionó una mayor ingesta de fibra. Aaltonen y col. en 2017, no detectaron síntomas clínicos a nivel serológico e histológico en un grupo de 869 celíacos adultos que consumieron avena como parte de la dieta sin gluten durante un año en comparación con los celíacos que no consumían avena. Del mismo modo, Sey y col. en 2011, no encontraron cambios significativos en los pacientes (recurrencia sintomática, recaída serológica, deterioro histológico) y otros indicadores como el peso, la hemoglobina, la ferritina, la albúmina y los niveles de transglutaminasa tisular (tTG) cuando consumían hasta 350 g / semana de avena como parte de su dieta, dicho ensayo se llevó a cabo por 12 semanas.

Por el contrario, Lundin y col. en 2003, realizaron un ensayo que incluía el consumo de 50 g de avena por día durante 12 semanas en 19 pacientes adultos que anteriormente solo usaban dietas libres de gluten, sólo uno de los pacientes desarrolló una atrofia parcial de las vellosidades. Del mismo modo, Tuire y col. (2012) encontraron linfocitosis intraepitelial persistente en el intestino delgado, siendo el consumo de avena el único factor significativo que contribuyó a este estado en pacientes adultos con celiacía, aunque sólo se encontraron efectos menores de la linfocitosis intraepitelial en la arquitectura de las vellosidades.

En ensayos con niños, Koskinen y col. en 2009, estudiaron los niveles de depósitos de anticuerpos de tipo IgA dirigidos a tTG2 en la mucosa yeyunal al someter a 23 niños celíacos a una dieta con avena por dos años y no encontraron cambios significativos. Gatti y col. en 2013 no encontraron síntomas gastrointestinales clínicos ni complicaciones en las pruebas de permeabilidad intestinal sobre un grupo de niños después de una dieta de 6 meses que contenía avena pura. Del mismo

modo, Lionetti y col. en 2018 no encontraron diferencias en los datos clínicos, serológicos y de permeabilidad intestinal después de 6, 9 y 15 meses de ensayos de diseño cruzado, doble ciego, controlados con placebo en 177 niños que estuvieron más de dos años bajo una dieta libre de gluten.

Sin embargo, Tjellström y col. en 2014 reportaron niveles mejorados de ácidos grasos fecales de cadena corta incluyendo ácido acético y ácido n-butírico en el grupo de niños con dietas enriquecidas con avena, respecto al grupo de dieta estándar, lo cual podría presentar un riesgo potencial de desarrollo de inflamación de la mucosa intestinal.

## 7.2. Sensibilidad no celíaca al gluten y alergia al trigo

Hasta hace pocos años, la celiaquía era la única condición en la cual la dieta debería ser libre de gluten. No obstante, en los últimos años, ha surgido una corriente de alimentación libre de gluten/trigo, además de la identificación de otras patologías provocadas por la ingesta de estos alimentos. Así, se han descrito como entidades independientes: la alergia al trigo y la sensibilidad no-celíaca al gluten. Su prevalencia en conjunto es relativamente alta (hasta 10% de la población) (Ortiz y col., 2016). A su vez, si bien sus formas de presentación clínica y su relación con la ingesta pueden ser similares, sus mecanismos patogénicos, forma de diagnóstico y tratamiento difieren. Por definición, la sensibilidad no-celíaca al gluten es una patología caracterizada por la aparición de una serie de manifestaciones digestivas y extradigestivas relacionadas con la ingesta de gluten y otras proteínas del trigo. Aún no existe certeza respecto a su prevalencia, se encontró que, en pacientes mayores de 16 años y con intestino irritable, la frecuencia se ubica entre 15 y 40%. En cuanto a su patogenia, a diferencia de lo que ocurre en la celiaquía, los pacientes no presentan alteraciones en la permeabilidad intestinal y en lugar de predominar la activación de inmunidad adquirida, la evidencia sugiere que se activarían mecanismos de inmunidad innata (Sapone y col., 2010). Además, no son las prolaminas del trigo las que provocan la sensibilidad no-celíaca al gluten, sino que otras proteínas, incluyendo los inhibidores de la  $\alpha$ -amilasa/tripsina, algunos carbohidratos e incluso la levadura podrían contribuir a generar síntomas propios de esta enfermedad (Jericho y col., 2016).

Por otro lado, la alergia al trigo es un tipo de reacción inmunológica de hipersensibilidad a proteínas del trigo (no sólo prolaminas) en la cual la IgE y la liberación de mediadores químicos como histamina juegan un rol fundamental. Se caracteriza por la presencia de síntomas digestivos, respiratorios y/o cutáneos, como consecuencia de la exposición al trigo a través de las mucosas

(digestiva o respiratoria) o la piel. En estudios realizados en Europa, se ha detectado entre un 0,5 y un 9% en niños y, dicha prevalencia, disminuye con la edad (Ortiz y col., 2016).

## **8- ALIMENTOS FUNCIONALES**

En las últimas décadas la tendencia en la selección de alimentos por parte de los consumidores se ha modificado ampliamente, conforme se ha incrementado el universo de productos disponibles. Actualmente los consumidores exigen mayor calidad en los productos, sobre todo en el aspecto que relaciona a la alimentación con la salud. En las sociedades desarrolladas el concepto de nutrición ha evolucionado de “nutrición adecuada o suficiente” a “nutrición óptima” (Silveira Rodríguez y col., 2003). Esta tendencia no es casual, la misma está relacionada a un mayor manejo de la información por parte de los consumidores acerca de las relaciones que existen entre una buena alimentación y una buena salud. Esta mayor información disponible puede relacionarse tanto con que los gobiernos son interesados directos en mantener una población más saludable, que a la vez reduce los costos de salud pública, y por otro lado el sector privado industrial que busca instalar nuevos productos en el mercado (Alvídrez-Morales y col., 2002). Muchos de estos “alimentos saludables” pueden categorizarse como alimentos funcionales.

El concepto de alimentos funcionales nació en la década del 80 en Japón y con el tiempo se propagó a América del Norte, Europa y el resto del mundo (Diplock y col., 1999; Lau y col., 2012). La sensibilidad de los consumidores sobre la importancia de los alimentos funcionales ha crecido mucho en los últimos años (Krystallis y col., 2008). Este grupo de alimentos hace referencia a aquellos que han demostrado afectar beneficiosamente algún/as función/es del cuerpo, de una forma relevante, incrementando el estado de salud o bienestar o reduciendo el riesgo de contraer enfermedades o de muerte, más allá de su efecto nutritivo intrínseco (Diplock y col., 1999). Además, estos alimentos deben proporcionar su efecto benéfico al ser consumidos en las cantidades normales que se espera en la dieta.

El efecto “funcional” de estos alimentos puede relacionarse con su aporte sobre una o varias funciones del organismo (Alvídrez-Morales y col., 2002; Silveira Rodríguez y col., 2003). Además, pueden ser tanto alimentos naturales como modificados o diseñados. Añadir, aumentar o reducir la concentración o hacer más biodisponible un determinado componente, pueden ser estrategias tecnológicas para crear nuevos alimentos funcionales (Roberfroid, 1999). La reglamentación sobre alimentos funcionales varía entre países y prácticamente no existe una legislación clara sobre los mismos, aunque dependiendo del caso se ha avanzado más o menos en la normativa. Por otra parte, el Sistema del Codex Alimentarius FAO/OMS no proporciona directrices o

especificaciones claras para los alimentos funcionales. Debido a esto es que también existe tal heterogeneidad entre países sobre el tema. En nuestro país la definición de los alimentos funcionales es analizada por un grupo de trabajo ad-hoc creado en el año 2009 por la Comisión Nacional de Alimentos (CONAL). Otro de estos grupos ha avanzado en el estudio de los prebióticos y probióticos, elaborando dos protocolos que establecen los requisitos y evaluaciones para la inclusión de probióticos y/o prebióticos en un alimento. Dichos proyectos, fueron incorporados al Código Alimentario Argentino (CAA) a fines del año 2011, a través de las siguientes normas: Resolución Conjunta 229/2011 SPRel y 731/2011 SAGyP y Resolución Conjunta 261/2011 SPRel y 22/2011 SAGyP. (Moreno, 2012).

En Argentina los grupos de alimentos funcionales presentes en el mercado corresponden a probióticos (leches, yogures y quesos), alimentos con fibra (panes, barras de cereal, cereales para desayuno, lácteos con prebióticos), alimentos simbióticos (que contienen tanto probióticos como prebióticos), alimentos con fitoesteroles como leches, jugos, panes, entre otros (Olivera Carrión, 2007; Olagnero y col., 2007).

Dentro de los más difundidos se encuentran los que basan su “funcionalidad” en la fibra dietaria. La misma puede ser definida como “los restos de células vegetales comestibles, polisacáridos, lignina y sustancias asociadas resistentes a la digestión por las enzimas alimentarias de los seres humanos” (Gordon, 1999). Según la American Association of Cereal Chemists “la fibra alimentaria es la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión en el intestino delgado humano con fermentación completa o parcial en el intestino grueso” (AACC, 2000). La fibra dietaria se encuentra sólo en alimentos de origen vegetal: granos de cereales, legumbres, frutas, verduras, frutos secos y semillas. Los componentes típicos de fibra dietaria incluyen celulosas, hemicelulosas, ligninas, pectinas, y una variedad de gomas y mucílagos. La heterogeneidad de la fibra dietaria es la razón principal que explica la diversidad de sus efectos fisiológicos.

Es sabido desde hace mucho tiempo que una dieta con cantidades adecuadas de fibra conlleva una variedad de beneficios a la salud (Olagnero y col., 2007), como por ejemplo la atenuación del nivel del colesterol y/o de glucosa en sangre (AACC, 2000). Se han establecido recomendaciones de ingesta diaria de fibra dietaria en adultos de 20 a 35 g/día o de 10 a 14 g/100 Kcal, mientras que para niños mayores de 2 años (hasta los 18 años) se recomienda una ingesta diaria calculada como 5 g/día sumado a la edad, por ejemplo, en un niño de 10 años la recomendación es de 15 g/día (Escudero Álvarez y González Sánchez, 2006). En nuestro País el Código Alimentario Argentino (CAA) dispone en su Capítulo V (Normas para la Rotulación y Publicidad de los Alimentos) un Valor Diario de Referencia (VDR) para fibra alimentaria de 25 g/día. Así mismo

establece en alimentos sólidos un contenido mínimo de 3 g de fibra/100 g para la rotulación del alimento como “fuente de fibra”; mientras que para la utilización del rótulo “alto contenido de fibra” se exige un contenido igual o mayor a 6 g de fibra/100 g (CAA, 2022). Cabe aclarar que el CAA prohíbe la utilización de “declaraciones de propiedades saludables”, aunque la Comisión Nacional de Alimentos (CONAL) se encuentra estudiando una propuesta de incorporación de un artículo referido a las declaraciones de propiedades saludables que fue presentada en el año 2009 (Moreno, 2012).

Tradicionalmente se ha clasificado la fibra dietaria como fibra soluble e insoluble, aunque esta clasificación ha evolucionado en los últimos años con la incorporación de nuevas sustancias a la categoría de fibra dietaria, como es el caso de la inulina, fructooligosacáridos (FOS), almidón resistente y azúcares no digeribles. Sin embargo, a fines prácticos la solubilidad de la fibra dietaria sigue siendo una clasificación útil y aceptada para el diseño de alimentos y dietas alimentarias (Escudero Álvarez y González Sánchez, 2006). Una clasificación más acertada es la de fibra fermentable y no-fermentable, porque se asemeja más a la realidad del efecto que ésta ejerce en el organismo luego de su ingesta (Sanchez Almaraz y col., 2015).

La fibra insoluble en agua está representada principalmente por componentes de la pared vegetal como la celulosa, ligninas y algunas hemicelulosas, mayormente presentes en granos y vegetales. Por otro lado, la fibra soluble en agua se compone de polisacáridos tales como pectinas, gomas, mucílagos y hemicelulosas que se encuentran en frutas, avena, cebada y legumbres. También se considera fibra soluble a la inulina, FOS, almidón resistente y azúcares no-digeribles. La funcionalidad de la fibra insoluble está asociada a la reducción del tiempo de tránsito intestinal, al aumento de la masa fecal y a la generación de heces más suaves, mientras que la fibra soluble retrasa el vaciado gástrico, disminuye la absorción de glucosa, mejora la función inmune y disminuye los niveles de colesterol sérico (Dreher, 2001; Escudero Álvarez y González Sánchez, 2006).

La incorporación de fibra a productos de consumo masivo para desarrollar nuevos productos que puedan ser clasificados (por ejemplo en EEUU) como “buena fuente de fibra” o “excelente fuente de fibra” (proporcionando 10% o 20% del valor diario establecido como referencia en la dieta), implica un desafío tecnológico ya que la cantidad y la funcionalidad de la fibra deben medirse sobre el producto terminado (Sivam, y col., 2010; FDA, 2013) y en ciertas matrices alimentarias la incorporación de la misma puede cambiar sustancialmente las propiedades organolépticas del alimento (Marlett, 2001). En Estados Unidos están permitidas algunas declaraciones de propiedades que asocian la salud con el contenido de fibra dietaria en ciertos productos: 1- productos de granos, frutas y vegetales cuyo contenido de fibra ayuda a reducir el riesgo de cáncer;



2- productos de granos, frutas y vegetales que contienen fibra (sobre todo fibra soluble), ayudan a reducir el riesgo de enfermedades coronarias; 3- el salvado de avena ayuda a reducir el riesgo de enfermedades coronarias; 4- productos de *Plantago psillium* ayudan a reducir el riesgo de enfermedades coronarias; 5- los granos enteros ayudan a reducir el riesgo de enfermedades coronarias y ciertos tipos de cáncer (Dreher, 2001).

### 8.1. Panificados funcionales

El pan es un alimento ampliamente consumido en Occidente por lo que su mejora nutricional constituye un gran desafío tecnológico. Existen panificados formulados con incorporación de ingredientes no tradicionales para incrementar el contenido de fibras, antioxidantes, ácidos grasos poliinsaturados, proteínas de alto valor nutricional, fortificados en vitaminas o minerales, entre otros. El número de investigaciones y desarrollos en panes funcionales es muy vasta y variada, especialmente en los últimos años.

Liatis y colaboradores en 2009, informaron una disminución en el colesterol-LDL circulante en pacientes con diabetes tipo 2 al reemplazar en su dieta pan común por panes enriquecidos con  $\beta$ -glucanos (polisacáridos no almidonosos presentes en avena, cebada, centeno, entre otros). Los efectos benéficos para la salud de los  $\beta$ -glucanos están asociados a su carácter inmunomodulador, como así también a su actividad anticancerígena (Rahmani y col., 2019).

Rubel, en 2015, estudió la obtención de inulina a partir de tubérculos de topinambur, su caracterización y finalmente su agregado a masas de harina de trigo para la obtención de pan blanco enriquecido con fibra dietaria. Pudieron desarrollar panes ricos en fibra soluble con buena aceptación, posibilitando el aumento en la ingesta de fibra dietética.

Bigne en 2016 evaluó la posibilidad de utilizar harina de algarroba para la elaboración de productos panificados con un perfil nutricional mejorado, aprovechando el alto contenido de fibra y minerales de la misma, fomentando a su vez una diversificación en las posibles aplicaciones de la harina de algarroba. Los panes con una sustitución de 15% de harina de trigo por harina de algarroba dieron lugar a contenidos de fibra cercano al 7%, clasificando al producto como "rico en fibra", además de incrementar significativamente el contenido de minerales. Sumado a esto, encontró que los parámetros de aceptabilidad de los panes fueron buenos.

La fibra dietética puede ser incorporada a los panificados desde diversas fuentes. En bibliografía se puede encontrar un amplio espectro, por ejemplo: salvado de trigo, cebada, lino, girasol, avena, almidón resistente (Bijlwan y col., 2019; Koubaier y col., 2015; Skabanja y col., 2014; Sreerama y col., 2010).

## 8.2. Panes con avena

En el caso particular de los granos de avena, se han realizado algunas investigaciones sobre su uso para mejorar el perfil nutricional de los productos de panificación a base de harina de trigo pan. En los primeros trabajos en el tema, se ha encontrado que la sustitución (de hasta un 25%) de la harina de trigo con harina de avena en la elaboración de panificados, aumenta la tolerancia al amasado a medida que aumenta el grado de sustitución y que la magnitud de los efectos generados en las mezclas está relacionada con el tipo de harina de avena utilizada (Oomah, 1983). McKechnie en 1983 señaló que la avena posee excelentes propiedades de retención de humedad, lo cual le otorga a los panes frescura por períodos de tiempo más prolongados y, a su vez indicó que la harina de avena puede sustituir la harina de trigo pan hasta en un 30%. En contraposición, existen autores que señalan que dicha sustitución no puede superar el 20%, debido a la incapacidad de las proteínas de avena de formar gluten, si se excede dicho porcentaje, se obtienen panes apelmazados, húmedos y pegajosos (Brümmer y col., 1988, citado por Flander y col., 2011). Según Collar (2007) la incorporación de avena mejora las características fermentativas de la masa, favorece el color de la corteza y el carácter blando de la miga. Rieder y col. (2012) encontraron al incorporar salvado de avena al pan de trigo que la presencia de  $\beta$ -glucanos de alto peso molecular aumenta la viscosidad de la fase acuosa de la masa, lo cual estabiliza las celdas de gas y provoca el aumento de volumen de pan. El salvado utilizado por estos autores fue un salvado comercial, por tanto estaba tratado térmicamente, con el objetivo de inactivar enzimas endógenas y, en consecuencia, que no se produjera la degradación de los  $\beta$ -glucanos por acción de dichas enzimas.

Un grupo de investigación irlandés observó la influencia de la adición de distintas fracciones de avena en las cualidades de los panes, y determinó que la sustitución de 10% de una harina blanca de trigo con harina de avena producía un color oscuro óptimo en el pan, mejorando el color de la corteza y el carácter blando de la miga (Gormley y Morrissey, 1993). A su vez, Flander y col. en 2011, señalaron que el uso del grano entero de avena proporciona nutrientes muy valiosos, tales como: fibra soluble, proteínas, lípidos insaturados, vitaminas, minerales y fitoquímicos. El complejo de fibra dietaria con estos antioxidantes y otros fitoquímicos nos protegen de enfermedades cardiovasculares y de algunos tipos de cáncer.

La atención de los expertos en nutrición está puesta especialmente en los cultivos de avena y cebada. Además de por su abundancia y disponibilidad, porque presentan un alto contenido de fibra dietaria soluble, de los cuales los  $\beta$ -glucanos tienen un rol importante en los beneficios de la salud (Havrlentová y col, 2011 y Rahmani y col., 2019).

Por todo lo detallado anteriormente es que la avena puede considerarse un cereal con un reservorio muy importante de ingredientes funcionales que pueden ser utilizados para generar beneficios en la salud humana. Combinando variedades de avena de alto contenido de  $\beta$ -glucanos con diferentes variedades puras de trigo pan argentino de buena aptitud panadera, se podrían obtener premezclas para panes enriquecidos en fibra.

## **HIPÓTESIS**

- 1- El desarrollo de panificados con variedades puras de trigo pan y de avena de alto contenido de  $\beta$ -glucanos producirá mejoras en la alimentación, basadas en la incorporación de fibra dietaria, proteínas y lípidos.
- 2- La incorporación de avena a los productos panificados logrará mejoras en las características reológicas y fermentativas de las masas, y en la calidad del pan como también un aumento en el tiempo de conservación del producto final.
- 3- Se lograrán obtener panificados funcionales libres de trigo pan, utilizando variedades puras de avena que se encuentran disponibles actualmente en el mercado, de mayor contenido de  $\beta$ -glucanos y de buena calidad panadera.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar la calidad industrial, nutricional y vida útil de harinas de trigo y de avena obtenidas en el laboratorio. Formular premezclas con y sin trigo pan y evaluar las características nutricionales, sensoriales y vida útil de los panificados obtenidos.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1- Caracterizar los granos de trigo y avena que se destinarán a la molienda.
- 2- Evaluar la efectividad de tratamientos térmicos en avena para inactivar enzimas.
- 3- Caracterizar fisicoquímica y funcionalmente los productos de la molienda de cada grano.
- 4- Evaluar nutricionalmente los productos de molienda de cada grano.
- 5- Formular premezclas considerando aspectos nutricionales, aptitud organoléptica y vida útil.
- 6- Caracterizar física y funcionalmente las premezclas de harinas.
- 7- Evaluar nutricionalmente las premezclas elaboradas.
- 8- Evaluar la vida útil de cada harina y premezcla.

- 9-** Evaluar la aptitud de las diferentes harinas para la elaboración de panificados y determinar su calidad panadera mediante el cálculo del Valor Panadero.
- 10-** Determinar la aceptabilidad de los consumidores y el perfil nutricional de los productos elaborados.
- 11-** Evaluar la vida útil de los panificados elaborados.
- 12-** Formular y evaluar calidad nutricional de panificados libres de trigo pan.

# **CAPÍTULO II**

# **MATERIALES Y MÉTODOS**

## 2.1. MATERIALES

### 2.1.1. Trigo

Se emplearon tres variedades puras de trigo pan (*Triticum aestivum* L.): Buck Meteoro, MS INTA BONAERENSE 514 y ACA 356 provistas por el grupo de mejoramiento de la Chacra Experimental Integrada INTA- Barrow, Tres Arroyos, Buenos Aires.

En Argentina, las variedades de trigo pan se clasifican en 3 grupos de calidad, según sus cualidades industriales:

Grupo I: Trigos correctores para panificación industrial. Aptos para métodos industriales. Requerimientos: W>330; Gluten > 30%.

Grupo II: Trigos para panificación tradicional. Aptos para métodos de panificación sobre tablas, con fermentaciones de más de 8 horas. Requerimientos: W>280; Gluten= 28-30%.

Grupo III: Trigos para panificación directa: soportan tiempos de fermentación menores a 8 horas. Requerimientos: W= 230-280; Gluten= 27% (Seghezzo y Molfese, 2006).

Las tres variedades elegidas en este trabajo, y mencionadas anteriormente, se corresponden con el Grupo I de calidad y, por tal motivo, fueron elegidas.

### 2.1.2. Avena

En principio se trabajó con nueve variedades puras de avena (*Avena Sativa* L.). de gran importancia industrial en Argentina: Bonaerense INTA Calen, Bonaerense INTA Mana, Bonaerense INTA Maja, Bonaerense INTA Yapa, Bonaerense INTA Aiken, Bonaerense INTA Sureña, INTA Elizabeth, Bonaerense INTA Payé y Paloma INTA. Luego de estas 9 variedades se eligió solo una para la obtención de premezclas y todo el estudio posterior de masas y panificaciones.

Todos estos cultivares mencionados fueron provistos por el grupo de mejoramiento de la Chacra Experimental Integrada INTA- Barrow.

### 2.1.3. Cloruro de sodio

Se empleó sal fina corrediza (marca CELUSAL, Argentina).

#### 2.1.4. Levadura

La levadura utilizada tanto para la optimización de los tiempos de fermentación como para la elaboración de los panes fue levadura fresca prensada marca CALSA S.A. (Argentina).

## **2.2. METODOLOGÍA**

### 2.2.1. Producción, calidad y vida útil de harinas

#### 2.2.1.1. Caracterización de los granos de ambos cereales

2.2.1.1.1. Peso hectolítrico (PH): Es el peso de un volumen de 100 litros de trigo tal cual, expresado en Kg/hl. Se determinó utilizando una balanza Schopper de acuerdo a lo establecido en las Normas Argentinas de Comercialización XX (Trigo) y III (Avena). Es un importante factor de calidad en todas partes del mundo y está influenciado por la uniformidad, forma, densidad y tamaño del grano, además del contenido de materias extrañas y granos quebrados de la muestra. Para un mismo cereal, a mayor peso hectolítrico, mayor rendimiento de harina.

2.2.1.1.2. Peso de 1000 granos (PMG): La determinación se realizó mediante el conteo de 1000 granos de trigo y de avena sanos, con un contador electrónico y posterior pesado en balanza. Se expresó en gramos y da idea de la cantidad de harina que se puede obtener a partir de un lote.

2.2.1.1.3. Dureza del grano: Representa la cohesión del endosperma, la fuerza de unión entre proteína y almidón y es la razón de distintas formas de propagación de las fisuras. Método utilizado (PSI, AACC 55-30).

2.2.1.1.4. Contenido de humedad (HUM): se utilizó el método de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) empleando el equipo DS 2500 (FOSS, Hillerod, Dinamarca).

2.2.1.1.5. Contenido de proteína del grano (PROT): se cuantificó, al igual que la humedad, mediante el método NIRS.

2.2.1.1.6. Cenizas: se cuantifico según norma IRAM 15851, con mufla a 910°C.

#### 2.2.1.2. Tratamiento térmico del grano de avena

El tratamiento térmico empleado consistió en utilizar un microondas comercial (Panoramic, Argentina), a potencia máxima, con el fin de inactivar enzimas lipolíticas presentes en el grano de avena. Se adaptó a nuestro laboratorio el protocolo descrito por Keying y col. (2009), con el objeto



de identificar el par tiempo-temperatura de permanencia necesaria, que permita la inactivación de la lipasa en avena.

El protocolo utilizado fue el siguiente:

1-Se colocó en el centro del plato una bolsa de nylon con 20 g de avena. Los tiempos ensayados se realizaron por triplicado y fueron entre 0 y 60 segundos.

2-Se tomó la temperatura intergranaria de inicio de las muestras, con un termómetro pincha carne en el centro de la muestra.

3-Al finalizar la exposición de la muestra a los diferentes tratamientos de microondas, se volvió a tomar y registrar la temperatura alcanzada en el centro de la muestra.

4-Luego la muestra se vertió en una bandeja con papel para secar el vapor de agua producido.

5-Una vez secos y fríos, los granos se molieron empleando un molino Perten 120 (Perten, Hargersten, Suecia), con una malla de 0,5 mm.

Luego de haber realizado los tratamientos térmicos, se procedió a realizar el desgrasado de las muestras, según lo descrito por Peterson en 1998:

1-Un gramo de muestra molida se agitó con 10 ml de éter de petróleo por 30 minutos.

2-El solvente se descartó después de centrifugar a 2000g por 10 min.

3-Se repitió el punto 1 y 2.

4-La muestra desgrasada se secó en bloque seco bajo campana a 50°C.

Con la harina de avena desgrasada, se procedió a medir la actividad de la enzima lipasa, según lo descrito por Peterson en 1999. Se midieron todos los tratamientos por triplicado y todos tuvieron una muestra control.

1-Se pesaron 0,5 g de muestra en tubos Falcon de 15 ml con tapa.

2-Se agregaron 98 µl de aceite comercial Alto Oleico (Cañuelas, Argentina).

3-Luego se agregaron 330 µl de buffer (0,05 M Tris-HCl; pH= 7,5; con 1% de Triton X-100).

4-Se mezcló con varilla de vidrio y se incubó a 37°C por 1 hora en baño térmico (Vicking, Argentina). A los controles de cada tratamiento térmico se les agregó 100 µl de HCl 1N inmediatamente para detener la reacción.

5-Luego de la incubación, se les agregó a todos los tubos 100 µl de HCl 1N.

6-El Oleico hidrolizado del aceite se extrajo con isooctano. Para esto, se agregaron 5 ml de Isooctano a cada muestra y se hirvieron por 5 min.

7-Las muestras se pasaron por vortex y se centrifugaron a 2000g por 10 min.

Para la medición en el Espectrofotómetro, se procedió de la siguiente manera:

1-Se tomaron 4 ml del sobrenadante anterior y se le agregó 1 ml de reactivo de Cooper que usa acetato cúprico-piridina como agente de revelado. El reactivo de Cooper se prepara: 5% m/v en agua destilada. Se filtra y se ajusta pH con Piridina a 6,1.

2-Se mezclan las fases con vortex, se deja reposar por 10-20 seg y se mide la absorbancia en espectrofotómetro a 715 nm.

Para el cálculo y expresión de los resultados, se confeccionó una curva estándar de absorbancia (715 nm) vs concentración de oleico en isooctano ( $\mu\text{mol}/5\text{ ml}$  de Isooctano). Los puntos que se ensayaron fueron de 0 a 60  $\mu\text{mol}$  oleico/5 ml de isooctano.

Usando esa curva, se convirtieron los valores de absorbancia a concentración de ácido oleico. Por último, y tomando el control (avena sin tratamiento térmico) como el valor de 100% actividad lipasa, se calcularon los porcentajes de actividad de los demás tiempos de exposición al microondas. De esta manera, los resultados quedaron expresados en porcentaje de actividad lipasa en función del tiempo de desactivación utilizado.

#### 2.2.1.3. Molienda de granos

2.2.1.3.1. Molienda trigo pan: Se preparó y acondicionó la muestra (humedad 15,5%) según Norma IRAM 15.854-I (IRAM, 2008). La molienda se efectuó en un molino experimental Bühler 202 (Bühler, Uzwil, Suiza) de acuerdo con el método Bühler: Norma IRAM 15.854-II (IRAM, 2008).

2.2.1.3.2. Molienda Avena: Para la obtención de la harina de avena, la pepita se molió empleando un molino Perten 120 (Perten, Hargersten, Suecia), con una malla de 0,5 mm. De esta manera se obtuvo harina de avena que cumple con las especificaciones del CAA, Capítulo IX, Artículo 698, 20228.

#### 2.2.1.4. Caracterización física de las harinas obtenidas de la molienda

2.2.1.4.1. Color. La apariencia es clave en un producto para que sea del agrado de los consumidores. Existen diversos sistemas para la medición de color. Los más comunes son: sistema CIELAB, propuesto en 1971 por CIE (CIE, Commission Internationale de l'Éclairage), el cual define un espacio en coordenadas rectangulares ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) junto con otro en coordenadas cilíndricas ( $L^*$ ,  $H^*$ ,  $C^*$ ); y el sistema Hunter el cual es el más utilizado en los alimentos. Este último define un espacio cartesiano en que L es la claridad o luminosidad, va desde 0 (negro) a 100 (blanco). El parámetro a define a los componentes rojo - verde, rojo para valores positivos y verde

para negativos. El parámetro b define el componente amarillo – azul, amarillo para valores positivos y azul para negativos.

Se midieron los parámetros en el espacio CIELAB de luminosidad (L\*), rojo (a\*) y amarillo (b\*), empleando el equipo Minolta Chromameter CR-310 (Konica Minolta, Tokio, Japón) utilizando el método triestímulo Hunter-Lab.

#### 2.2.1.5. Caracterización química y funcional de las harinas obtenidas de la molienda

2.2.1.5.1. Almidón dañado: Se utilizó el Micro-método propuesto por Boyaci y col. (2004), basado en la acción de la enzima  $\alpha$ -amilasa sobre el almidón dañado en condiciones estandarizadas y la cuantificación indirecta de azúcares liberados por la enzima a través de refractometría.

Se pesaron 7 g de harina y se le agregaron 45 ml de buffer acetato (4,1 g de acetato de sodio anhidro + 3 ml de ácido acético y llevar a 1 litro con agua destilada, pH= 4,6-4,8). Luego se colocó la enzima  $\alpha$ -amilasa (50 mg) y se incubó en un baño a 30 °C por 15 min, con agitación manual cada 3 min. Por último, se colocaron 3 ml de una solución de ácido sulfúrico 3,68 N y 2 ml de una solución de Tungstato de sodio (12% p/v), ambas soluciones se agregaron para detener la acción de la enzima. Se filtró y se midió con refractómetro (e-LABShop, Argentina). El valor obtenido se expresó en °Brix: gramos de sólido en 100 g de solución. Por cada muestra se hizo un blanco (sin  $\alpha$ -amilasa en la incubación). El porcentaje de almidón dañado se calculó:

$$\% \text{ Almidón dañado} = [(B_2 - B_1) * V] / M * F \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

B<sub>1</sub>: °Brix del blanco

B<sub>2</sub>: °Brix de la muestra con la enzima

M: cantidad de muestra pesada (g)

V: volumen de los compuestos acuosos (ml), suma del volumen de líquido agregado en la medición.

F: Factor de corrección = 1,64

De esta manera, la diferencia entre la cantidad de sólidos obtenidos con y sin la acción de la enzima determina la cantidad de almidón dañado que había y donde, por lo tanto, actuó la enzima formando maltosa.

2.2.1.5.2. Pentosanos solubles e insolubles: La cuantificación de pentosanos totales y solubles se realizó siguiendo el método del Orcinol - HCl con las modificaciones realizadas por Hashimoto y col. (1987) utilizando una curva estándar de solución de xilosa.

En el caso de los pentosanos solubles, se pesaron 100 mg de harina y se le agregaron 10 ml de agua destilada. Luego se incubó por 2 h a 30°C y se centrifugó en centrífuga (Zelian, Argentina) por 10 min a 25 °C y 1000 x g. Se extrajo 1 ml del sobrenadante y se le agregó 1 ml de una solución 4N de ácido clorhídrico. Se incubó a 100°C por 2 hs. Una vez enfriado a temperatura ambiente, se pasó 1 ml a otro tubo y se agregaron: 3 ml de cloruro de hierro 0,1% (p/v) y 0,3 ml de Orcinol (concentración al 1% p/v, en alcohol). Se calentó en agua hirviendo por 30 min y se dejó enfriar. Por último, se midió la absorbancia a 670 nm con el espectrofotómetro (Biotraza 752 UV-Visible). El porcentaje de pentosanos se calculó empleando la ecuación Ec. 2.2:

$$\% \text{ Pentosanos Solubles} = A_{670} \times 2 \times m \times 0,88/100 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

$A_{670}$ : es la absorbancia a 670 nm

m: peso de la muestra.

Para la cuantificación de pentosanos totales, se pesaron 10 mg de harina y se le agregaron 2 ml de ácido clorhídrico (2 N). Se incubó a 100°C por 2 hs 30 min y se dejó enfriar. Luego se agregaron 2 ml de carbonato de sodio (2 N) y 2 ml de una solución de levadura (25 mg/ml en 0,2 M de buffer fosfato de sodio, pH= 7). Se dejó fermentar por 2 horas a 30°C, agitando con vórtex. Luego se centrifugó (10 min, 1000 x g). Se tomaron 2 ml del sobrenadante y se procedió de la misma manera en que se determinó pentosanos solubles. La concentración de pentosanos totales se calculó según la ecuación Ec 2.3.

$$\% \text{ Pentosanos Totales} = [(A_{670}/m \times 10) \times 3 \times m \times 0,88] / 100 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$A_{670}$ : es la absorbancia a 670 nm

m: peso de la muestra.

2.2.1.5.3. Índice de retención de agua alcalina (% IRAA): Se determinó de acuerdo al método 56-10 (AACC, 2000). Para esto, se pesó 1 g de harina en tubo de centrífuga de 15 ml de capacidad. Se agregaron 5 ml de solución 0,1N de bicarbonato de sodio. Se homogeneizó con vórtex. Se

incubaron por 20 min a temperatura ambiente, agitando con vórtex cada 5 min. Luego se centrifugó (15 min, 1000 x g) con centrífuga (Zelian, Argentina) y se descartó el sobrenadante. Luego se pesó el gel resultante. El porcentaje de IRAA (base 14% de humedad) se calculó empleando la ecuación Ec. 2.4.

$$\% \text{ IRAA} = [(PG/PH) \times (86/100 - \% \text{Hum}) - 1] \times 100 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde:

PG: Peso del gel (g)

PH: Peso harina (g)

%Hum: Contenido de humedad de la muestra (%)

2.2.1.5.4. Índice de capacidad retención de solventes (CRS): Se determinó de acuerdo al método 56-11 (AACC, 2000). Este ensayo incluyó soluciones de ácido láctico (5% p/p), sacarosa (50% p/p), carbonato de sodio (5% p/p) y agua desionizada, cuya retención está asociada a diferentes tipos de componentes químicos de las harinas. La evaluación combinada de estas 4 soluciones nos permitió predecir la aptitud panadera de las muestras. Generalmente, la capacidad de retención de ácido láctico está asociada con las características de las gluteninas, el carbonato de sodio con los niveles de almidón dañado y la sacarosa con características de los pentosanos. La retención de agua está asociada con todos los componentes hidrofílicos de la harina.

El procedimiento consistió en, para cada una de las 4 soluciones, pesar 5 g de harina en un tubo de centrífuga de 50 ml y luego agregar 25 ml de la solución correspondiente. Se homogeneizó con vórtex. Se incubaron por 20 min a temperatura ambiente, agitando con vórtex por cada 5 min. Luego se centrifugó (15 min, 1000 x g) y se descartó el sobrenadante. Luego se pesó el gel resultante. El porcentaje de CRS (base 14% de humedad) se calculó empleando la ecuación Ec. 2.5.:

$$\% \text{ CRS} = [(PG/PH) \times (86/100 - \% \text{Hum}) - 1] \times 100 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

donde:

PG: Peso del gel (g)

PH: Peso harina (g)

%Hum: Contenido de humedad de la muestra

2.2.1.5.5. Gluten: Se determinó el contenido de Gluten húmedo, seco é índice de gluten según el método IRAM 15864-II (IRAM, 2013) utilizando el equipo Glutomatic (Perten, Hagersten, Suecia).

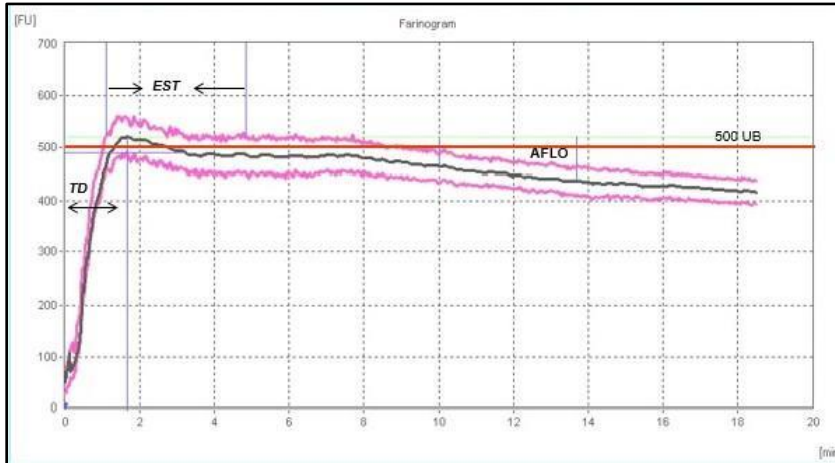
2.2.1.5.6. Índice de sedimentación en dodecil sulfato de sodio (IS-SDS) (Método 56-70.01, AACC, 2000). Se determinó midiendo el volumen en  $\text{cm}^3$  que se obtuvo a partir de 1,0 g de harina, la cual fue humectada con una solución de SDS al 2% p/v - ácido láctico 1:8 v/v y sometida a sucesivos períodos de agitación y reposo. Con este método se evaluó indirectamente la calidad de la proteína y la fuerza del gluten.

2.2.1.5.7. Actividad  $\alpha$ -amilásica. Se evaluó a través del Índice de Caída (Falling Number, FN), según Norma IRAM 15862 (IRAM, 2003) empleando el equipo Falling Number Mod. 1400 (Perten, Hagersten, Suecia).

Se colocaron en un tubo de vidrio 7 g de harina con 25 ml de agua destilada, se agitó vigorosamente a mano para homogeneizar la solución. Luego se colocó un émbolo en el interior del tubo y se introdujo en el equipo de FN en baño de agua a ebullición, automáticamente el equipo realizó 20 movimientos del émbolo y luego quedó en la parte superior del tubo. A partir de ahí, el émbolo comienza a caer y, los segundos que tarda en llegar al fondo del tubo indican de manera indirecta la actividad  $\alpha$ -amilásica de la harina. A mayor valor de FN (segundos), menor es la actividad  $\alpha$ -amilásica, y viceversa. Lo que se mide es el tiempo que tarda en producirse la licuefacción del almidón.

2.2.1.5.8. Farinograma: Se utilizó un Farinógrafo Brabender-300-g (Brabender OHG, Duisburg, Alemania) según Norma 15855 (IRAM, 2000).

Primero, se realizó un ensayo preliminar para determinar la cantidad de agua necesaria para llegar a la consistencia óptima (500 UB) y luego se realizó el farinograma con el fin de evaluar la calidad de la harina y su aptitud al amasado. En la Figura 2.1 se muestra un farinograma típico de una harina de trigo.



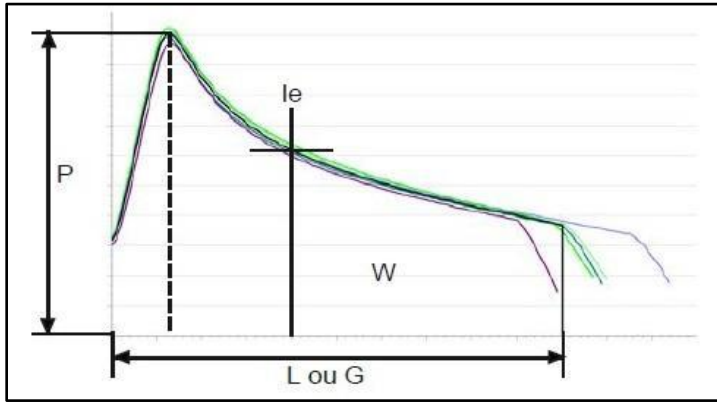
**Figura 2.1.** Curva farinográfica para una harina de trigo. Estabilidad (EST, min), Tiempo de Desarrollo (TD, min), Aflojamiento (AFLO, UB).

Descripción de los parámetros obtenidos:

- 1- Absorción de agua (AA, ml /100 g de harina): volumen de agua necesario para obtener una masa con una consistencia de  $500 \pm 20$  UB.
- 2- Tiempo de desarrollo (TD, min): es el tiempo necesario para alcanzar la máxima consistencia.
- 3- Estabilidad (EST, min): es el tiempo que transcurre desde que la parte superior de la curva supera los 500 UB hasta que cae por debajo de los 500 UB.
- 4- Aflojamiento (AFLO, UB): = es la diferencia de consistencia entre el punto de máxima consistencia y el punto alcanzado 12 minutos después.

2.2.1.5.9. Alveograma: Se utilizó un Alveógrafo Chopin (Alveo Lab Graph, Chopin Technologies, Villeneuve-La-Garenne, Francia), de acuerdo a la Norma IRAM 15857 (IRAM, 2012).

El ensayo del alveógrafo simula gráficamente el comportamiento de la masa en la fermentación imitando en gran escala la formación de los alvéolos originados en la masa por el  $\text{CO}_2$  que producen las levaduras. Mide la resistencia a la deformación y extensibilidad insuflando aire sobre una lámina de masa que se hincha hasta su rotura, dando curvas llamadas alveogramas (Figura 2.2).



**Figura 2.2.** Curva alveográfica de una harina de trigo.

Descripción de los parámetros obtenidos:

- 1- Fuerza panadera (W, J): superficie debajo de la curva
- 2- Tenacidad (P, mm): altura de la curva
- 3- Extensibilidad o Índice de hinchamiento (L o G, mm): largo de la curva
- 4- Relación P/L: expresa el equilibrio de la masa.

#### 2.2.1.6. Caracterización nutricional/química del producto de molienda.

2.2.1.6.1. Humedad: La determinación de humedad se realizó por gravimetría a través del método indirecto que se basa en la pérdida de peso de la muestra por evaporación del agua. Se realizó según método IRAM 15850-1 (IRAM, 2009), en el cual la muestra ( $5 \pm 0,001$  g) se seca en estufa con convección forzada (lonomex, Argentina) durante una hora a  $130 \pm 3^\circ\text{C}$ . El porcentaje de humedad se calculó por diferencia de peso medido antes y después del calentamiento de la muestra. El ensayo se realizó por triplicado. El porcentaje de agua se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación: Ec. 2.6

$$\% \text{ Humedad} = (m_1 - m_2) * 100 / (m_1 - m_0) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

$m_0$  = masa de cápsula de aluminio vacía (g)

$m_1$  = masa de cápsula de aluminio con harina luego antes del secado (g)

$m_2$  = masa de cápsula de aluminio con harina luego del secado (g)

2.2.1.6.2. Cenizas: Se determinó el contenido de cenizas empleando el método directo según AACC 08-01 (2000) basado en la oxidación completa de la materia orgánica, quedando las cenizas



en el residuo. Se pesaron ( $5 \pm 0,0001$ ) g de harina en cápsula de porcelana previamente calcinada y pesada. Se carbonizaron con mechero en triángulo de pipa y luego se calcinaron a  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta obtención de residuo blanquecino y peso constante. La determinación se realizó por triplicado. El contenido de cenizas se calculó de acuerdo a la ecuación: Ec 2.7

$$\% \text{ Cenizas} = (m_1 - m_0) * 100 / m \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde:

$m_0$  = masa de cápsula de porcelana vacía (g)

$m_1$  = masa de cápsula con residuo inorgánico obtenido luego de calcinar la harina (g)

$m$  = masa de harina (g)

2.2.1.6.3. Proteína: La determinación del contenido de proteínas se realizó por el método de Kjeldahl. Con este método se determina el contenido de nitrógeno total a través de la digestión de la materia orgánica con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, en presencia de la mezcla catalizadora ( $\text{K}_2\text{SO}_4$  anhidro y  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  en relación 10:1) en un digestor (BÜCHI K-435, Suiza). Una vez finalizada esta etapa se procede a la liberación del amonio formado como amoniaco, empleando  $\text{NaOH}$  32% p/v en un equipo semiautomático (BÜCHI K-350, Suiza), que se destila sobre 50 ml de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  4% p/v en presencia de indicador de Mortimer. Por último, se valoró directamente el borato de amonio formado utilizando  $\text{HCl}$  0,1032 N. Se realizó un blanco para evaluar la posible presencia de compuestos nitrogenados en los reactivos empleados. El porcentaje de nitrógeno se calculó empleando ecuación Ec 2.8.

$$\% \text{ Proteína} = (V_m - V_b) * N_a * 0,014 * F * (100) / m \quad (\text{Ec. 2.8})$$

donde:

$V_m$  = volumen de  $\text{HCl}$  gastado para titular la muestra (ml)

$V_b$  = volumen de  $\text{HCl}$  gastado para titular el blanco (ml)

$N_a$  = normalidad del  $\text{HCl}$  usado para titular

0,014 = peso del miliequivalente de N en g

$F$  = factor de conversión de nitrógeno a proteína (se utilizó 6,25 para harina de avena y 5,71 para harina de trigo)

$m$  = masa de muestra pesada (g)

#### 2.2.1.6.4. Lípidos:

Para harina de trigo la determinación de lípidos se realizó por extracción semicontinua con una mezcla de solventes orgánicos para su extracción, utilizando una modificación de la técnica AACC 30-25.01 (2000) en la cual se emplea el extractor de Soxhlet. Los lípidos de la harina fueron extraídos con éter de petróleo (fracción 30-60°) llevándose a cabo unas siete sifonadas para lograr una extracción completa. Una vez finalizada se evaporó el solvente y se pesó el residuo (extracto etéreo). Las determinaciones se realizaron por triplicado. El porcentaje de lípidos se calculó empleando la siguiente ecuación: Ec. 2.9.

$$\% \text{ Lípidos} = ((m_1 - m_0) * 100) / m \quad (\text{Ec. 2.9})$$

donde:

$m_1$  = masa del balón con extracto etéreo luego de evaporado el solvente (g)

$m_0$  = masa del balón vacío (g)

$m$  = masa de la muestra (g)

Para harina de avena, el contenido de lípidos se determinó empleando el método de Ratzlaff, según método 30-10-01 (AACC, 2000). Se pesaron alrededor de 2 g de muestra en un vaso de precipitado y se anotó el peso exacto. Se agregaron 10 ml de HCl al 25% y se colocó en baño termostático (Vicking, Argentina) a 90°C, agitando hasta que vire al color violáceo. Se vertió el contenido del vaso en una probeta de 100 ml de capacidad con tapa, se agregaron 2 ml de alcohol etílico y 50 ml de una mezcla de éter de petróleo:éter sulfúrico (50:50). Se mezcló por inversión y se dejó reposar durante 24 hs. Transcurrido dicho tiempo, se tomaron 10,00 ml de la fase etérea y se colocaron en un vaso de precipitado previamente tarado. Se evaporó y, por diferencia de peso, se calculó el contenido de lípidos de la muestra.

$$\% \text{ Lípidos} = ((m_1 - m_0) * V_f / 10) * 100 / m_2 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

$m_0$ : Peso del vaso (g)

$m_1$ : Peso del vaso con los lípidos (g)

$m_2$ : Peso de la muestra (g)

$V_f$ : Volumen fracción etérea antes de tomar la alícuota (ml).

2.2.1.6.5. Fibra Dietaria Total. Se determinó el contenido de Fibra Dietaria Total (FDT) de las harinas según AACC 32-05 (2000), utilizando el método enzimo-gravimétrico. A la muestra ( $1 \pm 0,001$  g) de harina se le adicionó buffer fosfato pH = 6, luego fue tratada con  $\alpha$ -amilasa termoestable a  $100^\circ\text{C}$  y digerida por vía enzimática con proteasa y amiloglucosidasa para eliminar las proteínas y el resto del almidón. Posteriormente, se precipitó la Fibra Dietaria (FD) por adición de 4 volúmenes de etanol 95% v/v y se dejó reposar durante 1 hora. Transcurrido ese tiempo la FD fue filtrada y lavada en pasos sucesivos con etanol 78%, etanol 95% y acetona pura, y posteriormente fue secada ( $105^\circ\text{C}$ ) y pesada. A uno de los residuos de FD se le determinó el contenido de cenizas incinerando la muestra a  $550^\circ\text{C}$  (Método AACC 08-01, 2000), y al otro se le determinó contenido de proteínas por el método de Kjeldahl (Método AOAC 920-152, 2000).

La FDT se calculó como el peso de la fibra dietaria filtrada al que se le descontó el contenido de proteínas y cenizas. Según las ecuaciones: Ec. 2.11; 2.12; 2.13 y 2.14.

$$FD \% = (M_1 - M_0) * 100/m \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$P\% = V_{HCL} * N_{HCL} * P_{meq} * F * 100/(M_1-M_0) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$C \% = (M_2-M_0) / (M_1-M_0) * 100 \quad (\text{Ec. 2.13})$$

$$FDT \% = FD\% - (P\% + C\%) \quad (\text{Ec. 2.14})$$

donde:

$M_1$ = masa del filtro con celite junto con el residuo de fibra dietaria (g)

$M_0$ = masa del filtro con celite (g)

$m$ = masa de muestra (harina) (g)

$M_2$ = masa del filtro con celite junto a las cenizas (g)

$V_{HCL}$  = volumen de HCl gastados en la titulación de la muestra (ml)

$N_{HCL}$  = normalidad del HCl

$P_{meq}$  = peso miliequivalente del nitrógeno (g/meq)

$F$  = factor de conversión de Kjeldahl (6,25 para harina de avena y 5,71 para harina de trigo)

$P \%$  = % de proteínas en el residuo

C % = % de cenizas en el residuo

2.2.1.6.6. Carbohidratos totales: Se calcularon los carbohidratos totales diferentes de fibra por diferencia, dado que el cien por ciento de las muestras está formado por la suma de los porcentajes de agua, cenizas, lípidos, proteínas, fibra dietaria total y carbohidratos distintos de la fibra.

2.2.1.6.7. Determinación del contenido de  $\beta$ -glucanos. Utilizando el kit de ensayo: Megazyme (1-3) (1-4)  $\beta$ -D-glucano (K-TDRF, Megazyme, Wicklow, Irlanda) según AACC 32-23 (2000).

Se molió la muestra a 0,5 mm y se pesaron entre 80-120 mg de muestra en un tubo de centrifuga. La muestra se humedeció con 200  $\mu$ l de etanol (50% v/v). Luego se agregaron 4 ml de buffer fosfato de sodio (20 mM, pH= 6,5) y se mezcló con vortex. El tubo se colocó en baño a ebullición por 1 min, se mezcló y se dejó otros 2 minutos con la finalidad de gelatinizar el almidón. Transcurrido ese tiempo, se mezcló y se colocó en baño termostático (Vicking, Argentina) a 50 °C durante 5 min. Luego, se agregaron 200  $\mu$ l de la enzima Lichenasa (10U) y se mezcló. Los tubos se taparon y se los incubó por 1 hora a 50 °C, mezclando vigorosamente 3 a 4 veces. Luego se agregaron 5 ml de buffer acetato de sodio (200 mM, pH= 4) y se mezcló con vortex. Se dejó equilibrar a temperatura ambiente por 5 min y se centrifugó a 1000 x g por 10 min.

Del sobrenadante se colocaron 100  $\mu$ l en 2 tubos de ensayo y se agregaron 100  $\mu$ l de la enzima  $\beta$ -Glucosidasa (0,2 U). A un tercer tubo, blanco de reacción, se le agregaron 100  $\mu$ l de buffer acetato de sodio (50 mM, pH= 4) y 100  $\mu$ l de agua destilada. Por último, un cuarto tubo control se le agregó a 100  $\mu$ l de estándar de glucosa (1mg/ml), 100  $\mu$ l de  $\beta$ -Glucosidasa. Los cuatro tubos se incubaron a 50 °C por 10 min. Luego a cada tubo se le colocaron 3 ml del reactivo GOPOD y se incubaron nuevamente a 50 °C por 20 min. Finalmente se midió la Absorbancia a 510 nm con Espectrofotómetro (Biotraza 752 UV-Visible).

El contenido de  $\beta$ -glucanos se determinó según la siguiente ecuación: Ec. 2.15.

$$\begin{aligned}\beta\text{-glucanos (\%)} &= \Delta A \times (FV/0,1) \times (1/1000) \times (100/W) \times (162/180) \times D && \text{(Ec.2.15)} \\ &= \Delta A \times (F/W) \times FV \times D \times 0,9\end{aligned}$$

Donde:

$\Delta A$ : Absorbancia luego del tratamiento con  $\beta$ -glucosidasa menos el blanco de reacción

F: factor de conversión de absorbancia a  $\mu$ g de glucosa

: 100 ( $\mu$ g de D-glucosa) / Absorbancia de 100  $\mu$ g de D-glucosa

FV: Volumen final (9,4 ml)

0,1: Volumen de la muestra analizada

1/1000: Conversión de  $\mu\text{g}$  a mg

100/W: factor para expresar el contenido de  $\beta$ -glucanos como porcentaje en peso de muestra

W: peso inicial de la muestra

162/180: factor para convertir D-glucosa libre (como se determinó) a D-glucosa anhidro como ocurre en los  $\beta$ -glucanos

D: Factor de dilución, si hubiese sido necesario.

$$\beta\text{-glucanos (\%, base seca)} = \beta\text{-glucanos (\%)} \times (100 / (100 - \text{Humedad muestra})) \quad (\text{Ec. 2.16})$$

2.2.1.7. Vida útil de las harinas. Se realizó la molienda de las harinas de trigo y avena y se las almacenó durante 10 meses en bolsas de papel correctamente cerradas a temperatura ambiente (entre 16 y 22°C). Durante ese período, una vez al mes se determinó acidez titulable, potencial de hidrógeno y humedad.

2.2.1.7.1. Determinación de la acidez titulable: Se realizó a través de la valoración de una suspensión de harina (10% p/v) con hidróxido de sodio (0,1 N) utilizando el método 02-31 de AACC (AACC, 2000). Se pesaron 10 g de harina y se le agregó 100 ml de agua destilada (previamente hervida y enfriada), se agitó y dejó reposar por 1 hora. Luego, al sobrenadante se le agregó fenolftaleína al 1% p/v y se tituló con NaOH (0,1 N), hasta lograr un color rosa persistente.

El NaOH 0,1N fue previamente valorado con ftalato ácido de potasio de la siguiente manera. Se pesaron entre 0,4 y 0,5 g de ftalato ácido de potasio (previamente secado en estufa por 30 min a 110 °C y enfriado) en un vaso erlenmeyer de 25 ml. Y se disolvió con agua destilada. Se añadieron 2 gotas de fenolftaleína (0,1% v/v en alcohol). Se valoró con la solución de NaOH 0,1N, lentamente y con agitación constante. Se registró el volumen gastado.

Se calculó el factor de la disolución (F) según Ec. 2.17:

$$F = (a / \text{Eq}) / V \times 0,1 \times 1000 \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde:

a: g de ftalato ácido de potasio

Eq: peso equivalente del ftalato ácido de potasio

V: volumen (ml) gastados de NaOH 0,1N

Para calcular la normalidad valorada ( $N_{\text{Ftalato}}$ ) se usó la Ec. 2.18:

$$N_{\text{Ftalato}} = 0,1 \times F \quad (\text{Ec. 2.18})$$

La acidez titulable se asocia a los mililitros de hidróxido de sodio necesarios para neutralizar la acidez que se produce naturalmente por el almacenamiento de las harinas. Se calculó según la ecuación Ec. 2.19.

$$\text{Acidez titulable} = \text{ml requeridos de NaOH}/20 \quad (\text{Ec. 2.19})$$

2.2.1.7.2. Determinación del potencial de Hidrógeno (pH): Se registró el grado de acidez presente en una suspensión acuosa de la harina, utilizando un peachímetro (Ohaus, Argentina) de acuerdo al método 02-52 AACC (2000). Se pesaron 10 g de harina y se le agregaron 100 ml de agua. Se agitó y dejó reposar por 30 minutos, se volvió a mezclar y se dejó reposar 10 min. Luego se tomó parte del sobrenadante y se midió el pH.

2.2.1.7.3. Humedad: se determinó el contenido de agua según se describió en el ítem 2.2.1.6.1.

## 2.2.2. Desarrollo de premezclas de harina de trigo pura con harina de avena de alto contenido en $\beta$ -glucanos.

Se formularon diferentes premezclas a partir de las harinas puras de trigo y avena. Las mezclas utilizadas fueron: 5, 15 y 25% de avena. Utilizando como harina de trigo base la variedad que mostró mejor aptitud panadera.

### 2.2.2.1. Caracterización fisicoquímica y funcional de las premezclas

2.2.2.1.1. Retención de solventes: se realizó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.1.5.3 y 2.2.1.5.4.

2.2.2.1.2. Farinograma: se realizó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.1.5.8.

2.2.2.1.3. Alveograma: se realizó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.1.5.9.

2.2.2.1.4. Vida útil de las premezclas: se realizó de acuerdo a los ensayos indicados en el ítem 2.2.1.7.

### 2.2.3. Caracterización de masas para pan

#### 2.2.3.1. Formulación y preparación de las masas

Las masas se confeccionaron mezclando las harinas en distintas proporciones (mencionadas en el ítem 2.2.2) en ausencia de levadura, con 1,5% sal y agua destilada en cantidad óptima (según absorción de agua del farinograma). El tiempo de amasado estuvo determinado por el tiempo de desarrollo farinográfico.

Para cada formulación, se colocaron en una amasadora planetaria Kenwood Major (Kenwood, Italia) los ingredientes sólidos (harinas y sal) y se mezclaron en seco. Luego se agregó el agua destilada durante el primer minuto de amasado a 50 rpm; transcurrido dicho tiempo, la amasadora se llevó a 90 rpm y se dejó en ese punto hasta finalizado el tiempo de desarrollo determinado según el farinógrafo. Se sacó la masa de la amasadora y se dejó reposar a temperatura ambiente durante 10 minutos, cubierta con papel film para evitar pérdidas de humedad superficial.

Por último, se realizó el laminado manual de la masa de la siguiente manera:

- 1- Se colocó la masa en una tabla de acrílico, a los costados se pusieron 2 espesores de 1 cm de alto. Con un rodillo de acrílico se la laminó 4 veces, se dobló a la mitad y se giró a la derecha.
- 2- Luego de laminó 8 veces, se volvió a doblar a la mitad y a girar a la derecha.
- 3- Se laminó otras 4 veces más, se dobló a la mitad y se dejó reposar por 15 minutos tapada con papel film.

#### 2.2.3.2. Comportamiento reológico de masas

2.2.3.2.1. Análisis de perfil de textura (TPA): Se cortaron discos de masa de 3 cm de diámetro y 1 cm de espesor con un sacabocado. A cada disco de masa se lo sometió a un ciclo de doble compresión empleando una deformación del 40% de la altura original con una sonda de aluminio SMSP/75 (de 7,5 cm de diámetro) y una celda de 25 kg empleando un texturómetro TA.XT2i (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido). Se esperó 5 s entre ambos ciclos. La velocidad del ensayo fue de 0,5 mm/s. Se ensayaron 20 discos por cada formulación. Se registró la fuerza (expresada en Newtons) en función del tiempo (expresado en segundos) obteniéndose un gráfico como el de la Figura 2.3, del cual se obtuvieron los parámetros descritos a continuación (Steffe, 1996).

Descripción de los parámetros obtenidos:

- 1- Dureza: es la fuerza máxima del primer ciclo de compresión. Se expresa en unidades de fuerza

(N).

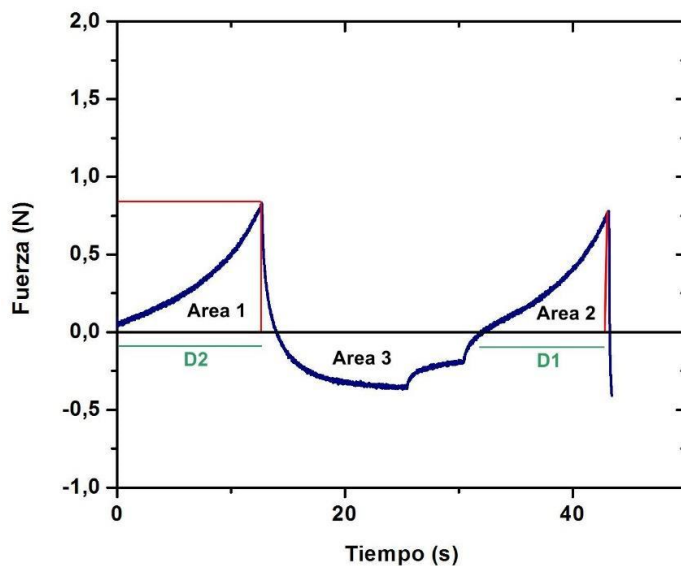
2- Consistencia: es la suma de las áreas positivas del primer (Área 1) y segundo (Área 2) pico. Posee unidades de Nxs.

3- Cohesividad: es el cociente entre el área de la segunda compresión (Área 2) y el área de la primera compresión (Área 1). Es un parámetro adimensional.

4- Adhesividad: área del pico negativo después del primer ciclo de compresión (Área 3), representa el trabajo necesario para despegar el émbolo de la superficie del alimento. Se mide en Nxs.

5- Elasticidad: altura que recupera el alimento durante el tiempo transcurrido entre el primer ciclo y el segundo y es la relación entre las distancias D1 y D2 ( $D1/D2$ ). Es un parámetro adimensional.

6- Gomosidad: producto de la dureza por la cohesividad. Se expresa en N.

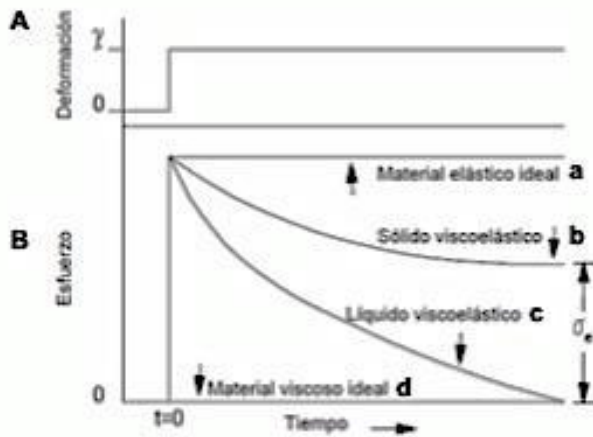


**Figura 2.3.** Curva típica obtenida por TPA para una masa panaria del presente trabajo.

2.2.3.2.2. Ensayos de relajación. El ensayo de relajación consiste en deformar el material aplicando una compresión a deformación constante (Figura 2.4.A) y registrándose la fuerza que opone el material para mantener dicha deformación en función del tiempo. Cuando el ensayo de relajación se aplica sobre diversos materiales, se observan diferentes comportamientos (Figura 2.4.B): si el material es sólido (elástico ideal) no experimenta relajación (Figura 2.4.B.curva a). Si el material posee comportamiento viscoso ideal (líquido), se relaja instantáneamente (Figura 2.4.B. curva d). Los materiales viscoelásticos poseen un comportamiento intermedio entre ambos, se relajan en forma gradual y el valor de esfuerzo final ( $\sigma_e$ ) dependerá de qué tipo de comportamiento predomine. Si predomina el comportamiento sólido sobre el líquido se alcanzará un valor de



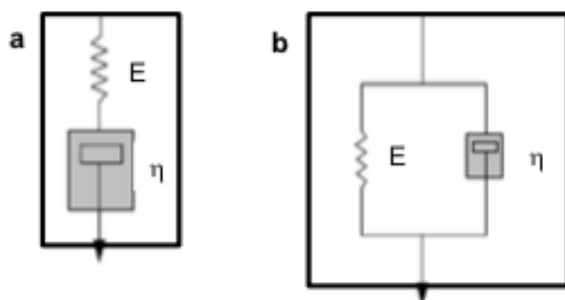
equilibrio positivo (Figura 2.4.B. curva b); en el caso que predomine el comportamiento fluido sobre el sólido el esfuerzo final será cero (Figura 2.4.B. curva c) (Steffe, 1996).



**Figura 2.4.** A) Deformación en función del tiempo; B) Curvas de relajación de diferentes materiales.  $\gamma_0$ : deformación aplicada.  $\sigma_e$ : valor de esfuerzo alcanzado en el equilibrio (Adaptado de Steffe, 1996).

El comportamiento viscoelástico de los materiales se puede representar mediante diferentes modelos. El comportamiento de fluido ideal obedece a la Ley de Newton, y se representa mediante un pistón trabajando dentro de un cilindro, mientras que el del sólido ideal está representado por un resorte y obedece a la Ley de Hooke. El pistón simboliza la disipación de energía en forma de calor mientras que el resorte representa la energía almacenada en el material.

Se considera que el material viscoelástico internamente trabaja con diferente combinación de resortes y pistones. Los modelos más sencillos son dos: el modelo de Maxwell con el resorte y el pistón en serie (Figura 2.5.a) y el modelo de Kelvin-Voigt con el resorte y el pistón conectados en paralelo (Figura 2.5.b).

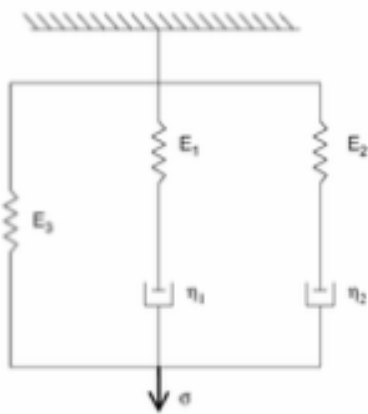


**Figura 2.5.** a) Modelo de Maxwell. b) Modelo de Kelvin-Voigt.

El modelo de Maxwell es el que frecuentemente se ha utilizado para interpretar los datos de las curvas obtenidas en los ensayos de relajación de fluidos viscoelásticos. Como los elementos están en serie, puede suponerse que la deformación total del material es igual a la suma de las dos deformaciones:

$$\gamma = \gamma_{\text{resorte}} + \gamma_{\text{pistón}}$$

Este modelo no considera el esfuerzo en el equilibrio. Por esta razón, el comportamiento viscoelástico en los alimentos puede ser mejor descrito empleando el modelo generalizado de Maxwell (Hassan y col., 2005; Lima y Singh, 2001), que consiste en varios elementos de Maxwell y un resorte, conectados en paralelo. El resorte contempla el término del esfuerzo en el equilibrio. El modelo que mejor ajusta en las masas contiene dos elementos de Maxwell asociado a un resorte (Figura 2.6).



**Figura 2.6.** Modelo de Maxwell generalizado aplicado a las masas.

La ecuación obtenida del modelo de Maxwell generalizado es la siguiente, Ec. 2.20.

$$\sigma(t) = \sigma_1 e^{-t/T1} + \sigma_2 e^{-t/T2} + \sigma E \quad (\text{Ec. 2.20})$$

donde:

$\sigma(t)$ : representa el esfuerzo medido durante el ensayo de relajación

t: representa el tiempo

Ti: es el tiempo de relajación y está definido como la relación entre la viscosidad y el módulo elástico ( $T_i = \eta_i / E_i$ )

Ei: es el módulo elástico y está definido como la relación entre el esfuerzo y la constante de deformación ( $E_i = \sigma_i / \varepsilon$ ), donde  $\varepsilon_0$  es el cociente de deformación respecto a la altura inicial de la muestra.

### Protocolo experimental de los ensayos de relajación

Los discos de masa se sometieron a una compresión de 40% a 0,5 mm/s durante 20 minutos empleando el texturómetro. El ensayo se realizó a 25 °C. Se registró la fuerza en función del tiempo. Para evitar deshidratación de las muestras durante el ensayo, los bordes fueron cubiertos con vaselina. El ensayo se realizó (n=3) por duplicado para cada formulación. Se ajustó la curva de esfuerzo en función del tiempo utilizando el modelo de Maxwell generalizado (Ec. 2.20) con el programa OriginPro 8.0 (Origin Lab Corporation, MA, Estados Unidos) considerando dos elementos de Maxwell la ecuación 2.20 quedaría según la ecuación 2.21 de la siguiente forma:

$$\sigma(t) = \sigma_1 e^{-t/T_1} + \sigma_2 e^{-t/T_2} + \sigma_E \quad (\text{Ec. 2.21})$$

donde:

$\sigma_i$  = factores pre-exponenciales (equivalentes a  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ).

$T_i$  = son los tiempos de relajación, definidos como la relación entre el componente viscoso y elástico ( $\eta_i/E_i$ ).

$\sigma_E$  = representa el esfuerzo del equilibrio.

## 2.2.4. Elaboración y evaluación de la calidad panadera

### 2.2.4.1. Formulación y preparación de las masas.

Se realizó según lo descrito en la sección 2.2.3.1 pero con el agregado de 3% de levadura fresca (Calsa, Argentina) disuelta en parte del agua requerida según el resultado del farinógrafo.

### 2.2.4.2. Optimización del tiempo de fermentación

Se realizaron las curvas de fermentación para evaluar el comportamiento de las masas frente al leudado y determinar el tiempo óptimo de fermentación de las masas frescas previo al ensayo de panificación. Una vez preparadas las masas (según 2.2.4.1) se cortaron porciones de 50 g y se introdujeron en probetas graduadas de 500 ml (5 cm de diámetro) provistas de un émbolo móvil, las cuales se colocaron en una fermentadora a 30 °C. Se midió el incremento del volumen de la masa en función del tiempo, en las primeras 2 horas la medición se realizó cada 10 min y luego cada 30 min hasta las 4 h; obteniéndose una gráfica como se muestra en la Figura 2.7. Las curvas se ajustaron con el programa Sigmaplot 10.0 empleando el modelo de Chapman de 3 parámetros (Ec. 2.22). El tiempo requerido para alcanzar  $\frac{3}{4}$  del incremento máximo se definió como el tiempo de fermentación ( $t_f$ ), debido a que durante el inicio del horneado continúa leudando la masa hasta que se fija la estructura y hasta producirse la muerte de las levaduras. Las curvas se realizaron por triplicado.

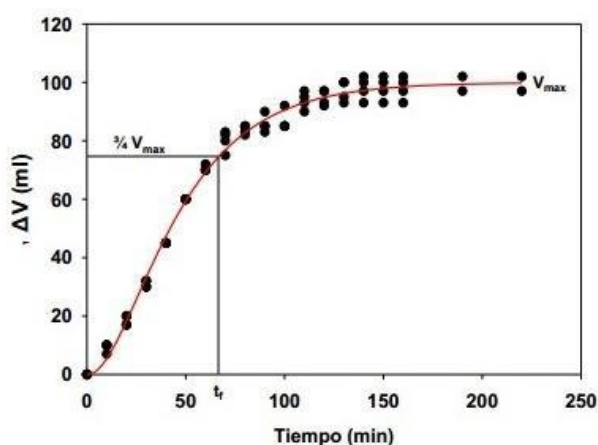


Figura 2.7. Curva de fermentación obtenida experimentalmente.

$$\Delta V = V_{max} * [1 - \exp(-b * t)]^c \quad (\text{Ec. 2.22})$$

donde:

$\Delta V$  = incremento de volumen de masa (ml)

t = tiempo del ensayo (min)

$V_{max}$  = volumen máximo ocupado por la masa (ml)

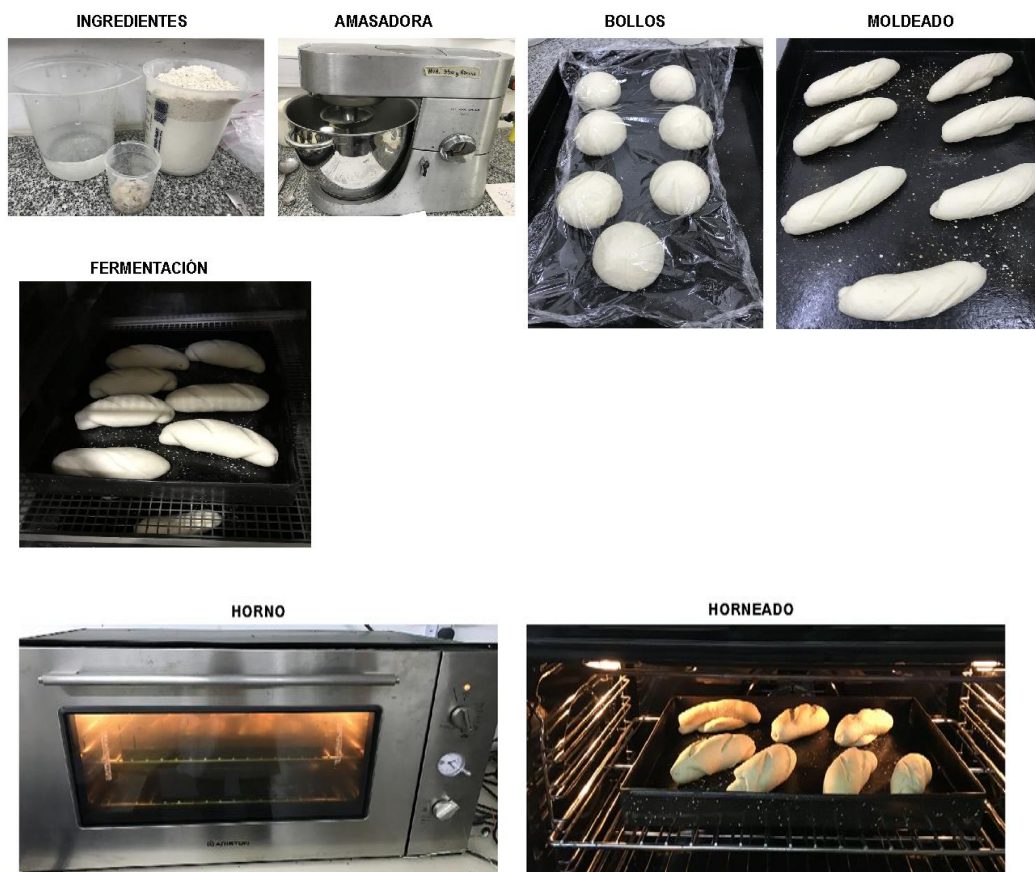
b = constante de velocidad de aumento de volumen de masa ( $\text{min}^{-1}$ )

$t_f$  = tiempo de fermentación, tiempo que tarda la masa en alcanzar  $\frac{3}{4} V_{max}$  (min)

c = parámetro relacionado con el punto de inflexión y la forma de la curva

## Protocolo de panificación

La masa para la obtención de los panes se preparó según lo descrito en 2.2.4.1. Una vez obtenida la masa, se cortaron y bollaron porciones de masa de 90 g, se dejaron descansar 10 min y se armaron las piezas tipo pan francés en una armadora de pan (MPZ, Argentina). Las piezas de pan se fermentaron en cámara de fermentación a 30 °C según tiempo de fermentación obtenido de la curva de fermentación que se describió en la sección anterior (2.2.4.2). La cocción se realizó durante 20 min a 210 °C en un horno eléctrico de convección (Ariston, Argentina). Una vez finalizado el horneado, se dejaron los panes a temperatura ambiente y una vez fríos se procedió a evaluar la calidad de los productos obtenidos a partir de las distintas formulaciones. Los ensayos fueron realizados por duplicados. La Figura 2.8 muestra las imágenes paso a paso del proceso de elaboración de los panificados, desde la mezcla de los ingredientes hasta el horneado de los mismos.



**Figura 2.8.** Imágenes que muestran las diferentes etapas del proceso de panificación.

### 2.2.4.3. Evaluación de la calidad panadera

La evaluación de la calidad panadera de todos los panes obtenidos en el trabajo experimental se realizó a través de diferentes ensayos: volumen específico de la pieza, color de corteza, textura y humedad de la miga.

2.2.4.3.1. Volumen Específico (VE). Se determinó el volumen de 5 panes de cada formulación por desplazamiento de semillas de colza en un pan-volumenómetro. Se midió el volumen inicial que ocupaban las semillas y luego se agregó un pan de masa conocida y se leyó el nuevo volumen alcanzado. El desplazamiento de semillas que se produce es directamente proporcional al volumen del pan. El volumen específico se calculó como el cociente entre el volumen y la masa del pan.

2.2.4.3.2. Color de corteza. Se realizó según lo descrito en la sección 2.2.1.4.1. Se realizaron 40 medidas de color por panificación en ocho panes y cinco campos por pan.

Se calculó el Índice de pardeamiento (IP) según se muestra en las ecuaciones Ec. 2.23 y 2.24, que es una medida de la pureza del color marrón (Buera y col., 1985). Este parámetro ha demostrado presentar una correlación lineal con la concentración de pigmento marrón por lo que ha resultado de utilidad para la evaluación de los cambios de color en alimentos que experimentan reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático. En particular, en panificación ha permitido observar variaciones en el color del pan debido a modificaciones en las formulaciones empleadas (Komlenic y col., 2010; Erben y col., 2015).

$$x = (a^* + 1,75L^*) / 5,645L^* + a^*-3,012b^* \quad (\text{Ec. 2.23})$$

$$\text{IP} = 100(x - 0,31) / 0,172 \quad (\text{Ec. 2.24})$$

donde,

a\*: posición entre verde y rojo

b\*: posición entre azul y amarillo

L\*: luminosidad

2.2.4.3.3. Humedad de miga: Se determinó humedad de las migas desgranadas según se describió en la sección 2.2.1.6.1 para la harina de trigo.

2.2.4.3.4. Textura de miga: Se realizó según se describió para masas en el ítem 2.2.3.2.1. Se determinó: firmeza, cohesividad, elasticidad y masticabilidad de la miga.

2.2.4.4. Análisis nutricional de los panes: La composición porcentual de los panes se evaluó, según los métodos descritos en el ítem 2.2.1.6.

### 2.2.5. Calidad sensorial de panes

Se diseñó un panel para análisis sensorial de modo de evaluar atributos de apariencia, textura, sabor y aceptabilidad global mediante un test de aceptabilidad con paneles no entrenados de al menos 40 personas, utilizando escalas hedónicas de 9 puntos tal como se muestra en la Figura 2.9.

Prueba de calidad sensorial de panes									
Evaluador N°:.....	Nombre:.....								
¿Con que frecuencia consume pan?	Diariamente	Semanalmente	Mensualmente						
¿Qué tipo de pan consume?	Con sal	Sin sal	Integral	Otros .....					
Usted recibirá tres rodajas de pan, ordenadas al azar. Utilizando la siguiente escala, por favor evalúe la aceptabilidad de cada atributo. Primero evalúe todos los atributos de la muestra 127, luego pruebe la muestra 517 y por último la muestra 346.									
<b>Rodaja N° 127</b>	Me disgusta	Me es indiferente	Me gusta						
Apariencia	☹			☺					
Textura	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----								
Sabor	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----								
Aceptabilidad global	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Rodaja N° 517</b>	Me disgusta	Me es indiferente	Me gusta						
Apariencia	☹			☺					
Textura	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----								
Sabor	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----								
Aceptabilidad global	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Rodaja N° 346</b>	Me disgusta	Me es indiferente	Me gusta						
Apariencia	☹			☺					
Textura	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----								
Sabor	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----								
Aceptabilidad global	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Figura 2.9. Planilla para el análisis sensorial de los panificados.

### 2.2.6. Vida útil de los panes

Los panes frescos recién horneados se enfriaron, se envolvieron individualmente en film y se envasaron en bolsas de polietileno durante 3 días a 20°C. Posteriormente se evaluaron los cambios producidos durante el almacenamiento por medio de medidas de humedad y de textura de miga. Las mediciones se realizaron en tiempo cero, en el de 1 día y en el de 3 días de almacenamiento.

2.2.6.1. Humedad de la miga. Se determinó igual que ítem 2.2.4.3.3.

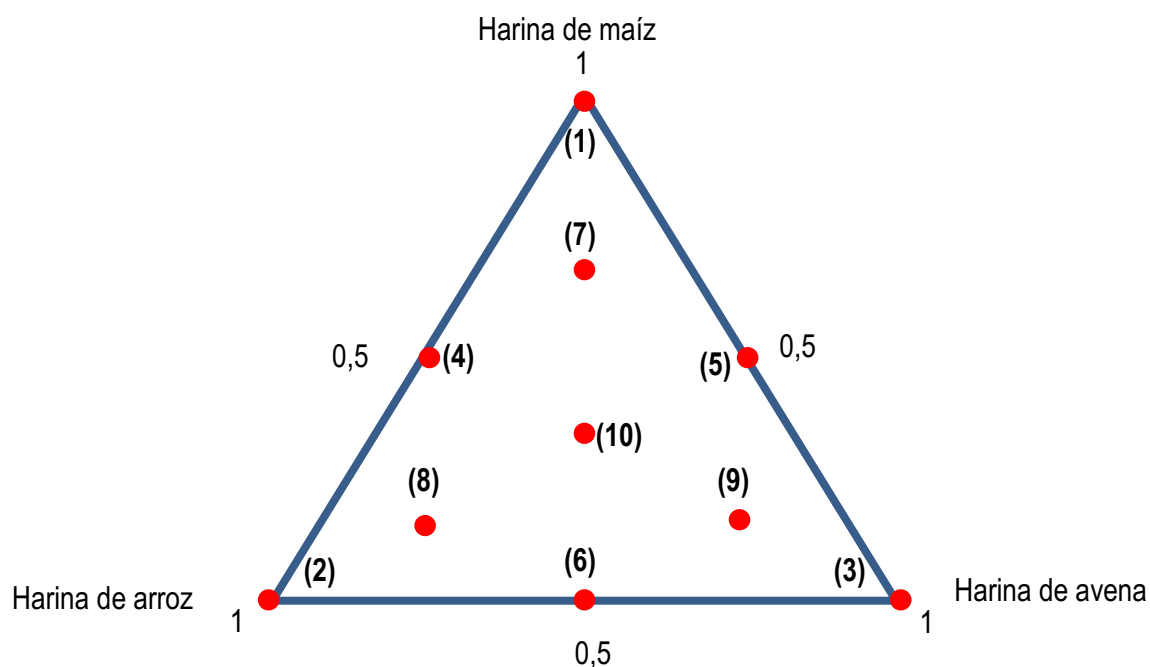
2.2.6.2. Textura de la miga: Se determinó según: 2.2.4.3.4.

### 2.2.7. Elaboración de panificados libres de trigo pan

Se elaboraron panes a partir de premezclas con harina de avena, de arroz y de maíz cuya formulación y elaboración fue adaptada de Sciammaro (2015).

#### 2.2.7.1. Diseño experimental y obtención de las formulaciones

Las combinaciones de las harinas (harina de maíz-HM, harina de arroz-HA, harina de avena-HAv) se obtuvieron con el programa DesignExpert 7.0 (StatEase INC). A través del programa se obtuvo un diseño de mezclas simplex lattice de segundo grado, el que constó de 10 puntos experimentales y un duplicado del punto central. En la Figura 2.10 se muestran en el plano los diferentes puntos estudiados y en la Tabla 2.1 la cantidad de cada harina utilizada en las diferentes formulaciones codificados y no codificados.



**Figura 2.10.** Diseño de mezcla de harinas utilizado.



**Tabla 2.1.** Diseño de mezclas de harinas utilizadas en la formulación de los panificados sin trigo de acuerdo con el diseño experimental triangular. Codificadas y no codificadas, expresadas como porcentaje de las harinas en cada formulación.

FORMULACION	No codificadas			Codificadas		
	AVENA (%)	ARROZ (%)	MAIZ (%)	AVENA (%)	ARROZ (%)	MAIZ (%)
1	-	-	100	0	0	1
2	-	100	-	0	1	0
3	100	-	-	1	0	0
4	-	50	50	0	0,5	0,5
5	50	-	50	0,5	0	0,5
6	50	50	-	0,5	0,5	0
7	16,66	16,66	66,66	0,16	0,16	0,66
8	16,66	66,66	16,66	0,16	0,66	0,16
9	66,66	16,66	16,66	0,66	0,16	0,16
10*	33,33	33,33	33,33	0,33	0,33	0,33

\*Punto central

La formulación que se utilizó para la preparación de los panificados se muestra en la Tabla 2.2. Todos los ingredientes a excepción de las harinas se mantuvieron constantes. Las harinas utilizadas fueron: harina de arroz a granel (HA), harina de maíz a granel (HM) y harina de avena (HA<sub>v</sub>) variedad Bonaerense INTA Calen.

Las harinas en su conjunto forman parte de un 25% de la formulación que se muestra en la Tabla 2.2. Se utilizó sacarosa (Ledesma, Bs.As.), polvo de hornear (Royal, Bs.As.), sal (Celusal, Bs.As.), levadura fresca (Calsa, Bs.As.), leche descremada líquida (La Serenísima, Bs.As.) y aceite vegetal (Cañuelas, Bs.As.).

**Tabla 2.2.** Ingredientes utilizados en la preparación de los panificados sin gluten.

<b>Ingrediente</b>	<b>Batido (g/100 g producto)</b>
Harina	25
Azúcar	2,5
Polvo de hornear	0,2
Sal	1,3
Levadura	1
Leche descremada	38
Huevos	26
Aceite Vegetal	6

Formulación adaptada de Sciamaro (2015).

### 2.2.7.2. Preparación de los batidos

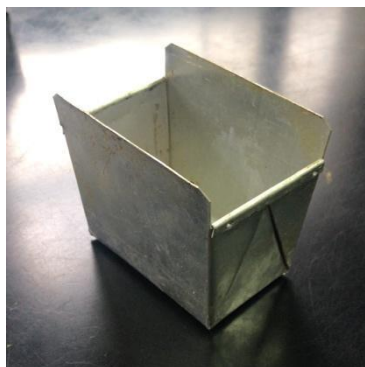
En un bol se pesó el aceite vegetal, luego se pesaron todos los ingredientes sólidos: harina/s, polvo de hornear, sal y azúcar. La leche se pesó y luego se le agregó la levadura fresca y se mezcló. Los huevos primero se batieron utilizando unabatidora Hishi (Philips de 6 velocidades, Argentina) y luego se pesó la cantidad necesaria para cada formulación. Una vez que todos los ingredientes estuvieron correctamente pesados y preparados se prosiguió de la siguiente forma:

1- Se batió el aceite vegetal y la leche con la levadura durante 1 minuto a la mínima velocidad (711 rpm).

2- Se agregó el huevo batido y se batió un minuto a 711 rpm.

3- Se agregaron los sólidos y se batió durante dos minutos más a máxima velocidad (858 rpm).

Al finalizar se obtuvo una mezcla de consistencia semi-líquida, incorporándose 80 g de la misma a cada molde metálico (Figura 2.11), previamente enmantecado y enharinado con harina de maíz.



**Figura 2.11.** Molde metálico

### 2.2.7.3. Determinación del tiempo de fermentación

Para determinar el tiempo óptimo de fermentación se realizaron pruebas utilizando la formulación del punto central del diseño de mezclas (punto 10, Figura 2.10 y Tabla 2.1). Los períodos de tiempo evaluados fueron: 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos, transcurridos dichos tiempos, los batidos se hornearon durante 35 minutos a  $180^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ . El tiempo de fermentación óptimo se determinó teniendo en cuenta el mayor valor de volumen específico obtenido (según método detallado en 2.2.4.3.1), esto combinado con la evaluación visual de la apariencia de los mismos.

### 2.2.7.4. Fermentación y horneado

Los moldes con los batidos se llevaron a fermentar a  $30^{\circ}\text{C}$  y 85% de humedad durante 50 minutos. Una vez terminada la fermentación se colocaron en horno durante 35 minutos a  $180 \pm 10^{\circ}\text{C}$ . Transcurrido ese tiempo, se sacaron del horno y se esperó hasta que se enfriaron para realizar las mediciones.

### 2.2.7.5. Evaluación de la calidad panadera

2.2.7.5.1. Volumen, Peso y Volumen Específico de las piezas de pan. Se determinó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.4.3.1.

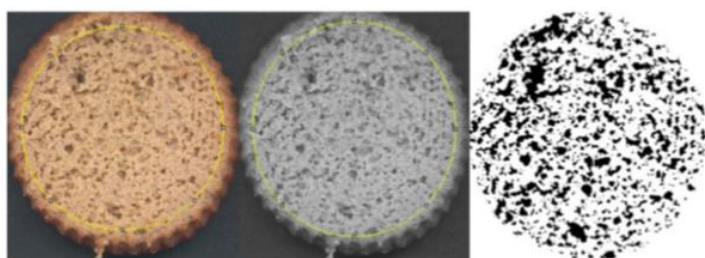
2.2.7.5.2. Color de la miga. Se realizó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.4.3.2.

2.2.7.5.3. Humedad de las migas desgranadas según se describió en la sección 2.2.4.3.3.

### 2.2.8 Alveolado de miga.

Para determinar los parámetros que caracterizan al alveolado de las migas se utilizó el software Image J (V. 1,46r, National Institute of Health, Estados Unidos). Como paso previo, se escanearon rodajas del panificado de aproximadamente 2 cm de espesor, del centro de cada pieza de pan. Una vez que las rodajas fueron escaneadas, se seleccionó el área a determinar el alveolado y se analizó con un complemento para Image J que determina alveolado de migas de panificados libres de trigo pan. El complemento lo que hizo fue convertir a la imagen a escala de grises en 8-bits. La segmentación de la imagen (conversión a imagen binaria) la realizó el programa por selección automática del valor del umbral. Este método de selección del valor umbral representó mejor los rasgos fundamentales de las imágenes que la selección de un valor umbral único e igual para todas las imágenes, debido a que existen pequeñas diferencias en los fondos de cada imagen. La imagen binaria tiene sólo dos niveles de grises: 0 para las áreas vacías (negro, alvéolos de aire) y

255 para las paredes de los alvéolos (blanco, miga de pan). Se asignó la categoría de objeto (celdas de aire) a aquellas zonas de la imagen que tenían una intensidad de gris entre 0 y el valor umbral que correspondiera a cada imagen. En la Figura 2.12 se muestra como ejemplo, la imagen escaneada de una rodaja, la selección de la parte central de la miga, la transformación a escala de grises y por último la imagen binarizada.



**Figura 2.12.** Secuencia del procesamiento de imágenes del análisis de alveolado de la miga.

Se obtuvieron los siguientes parámetros: densidad alveolar (número de alveolos/cm<sup>2</sup>), área ocupada por los alveolos (%), perímetro de los alveolos (mm) y tamaño medio de los alveolos (mm).

### 2.2.9. Evaluación nutricional de los panificados

2.2.9.1. Sobre la formulación óptima se determinó el contenido de cenizas. Se realizó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.1.6.2

2.2.9.2. Sobre la formulación óptima se determinó el contenido de proteínas. Se realizó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.1.6.3.

2.2.9.3. Sobre la formulación óptima se determinó el contenido de lípidos. Se realizó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.1.6.4.

2.2.9.4. Sobre la formulación óptima se determinó el contenido de fibra dietaria total. Se realizó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.1.6.5.

2.2.9.5. Sobre la formulación óptima se determinó el contenido de  $\beta$ -glucanos. Se realizó de acuerdo a lo indicado en el ítem 2.2.1.6.7.

# **CAPÍTULO III**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **GRANOS Y HARINAS**

### 3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN. GRANOS Y HARINAS

La caracterización industrial de los granos de trigo resulta importante para definir cuál de las variedades puras son apropiadas para utilizar en la elaboración de premezclas con avena para la elaboración de panificados.

#### 3.1. Caracterización de los granos de trigo

El peso hectolítrico (PH), el peso de mil granos (PMG), la dureza, el contenido de proteínas (PROT, base 13,5% de humedad), el contenido de cenizas (en base seca) y la humedad (HUM) del grano son variables útiles en la caracterización del grano de trigo pan como parámetros de calidad industrial. En la Tabla 3.1 se observan los resultados de la caracterización industrial del grano de las tres variedades puras de trigo pan provistas por el grupo de mejoramiento de la Chacra Experimental Integrada INTA- Barrow, Tres Arroyos, Buenos Aires.

El peso hectolítrico (PH) es uno de los parámetros que determina el grado de Comercialización de Trigo pan teniendo en cuenta la Norma XX "Norma de calidad para la comercialización de trigo pan (SENASA, 2004) y depende fuertemente de la calidad de la cosecha debido a que los granos se analizan tal cual como llegan del campo (Seghezzo y Molfese, 2006). Existen en la Norma XX tres grados de clasificación de comercialización de los granos denominados grados 1, 2 y 3 donde los límites para el PH son 79, 76 y 73 Kg/hl, respectivamente.

En la Argentina, las variedades de trigo se clasifican en tres Grupos de Calidad teniendo en cuenta sus aptitudes industriales: Grupo I (trigos correctores para panificación industrial), Grupo II (trigos para panificación tradicional) y Grupo III (trigos para panificación directa) (Comite de Cereales de Invierno de la Comisión Nacional de Semillas, 2021). La variedad MS INTA Bonaerense 514 (MS 514) presentó el menor valor de PH, clasificándose como grado 2 de comercialización, mientras que tanto las variedades Buck Meteoro (B. Meteoro) como ACA 356 lograron superar el límite de PH y pueden considerarse de grado 1 (Tabla 3.1). Sin embargo, el B. Meteoro resultó tener un PH significativamente superior al resto de las variedades ( $80,9 \pm 0,3$  Kg/hl). Este resultado permitiría inferir que el rendimiento harinero de esta última variedad debería ser el mayor.

Por otro lado, los valores obtenidos del peso de mil granos (PMG) evidencian que la variedad MS 514 tiene granos de mayor peso ( $30,3 \pm 0,4$  g) comparados con ACA 356 (Tabla 3.1). La diferencia con el PH podría estar atribuida a la presencia de materias extrañas en la muestra MS 514 al momento de realizar la determinación de PH. Si bien las materias extrañas no fueron determinadas, la medición de PH se hace con la muestra tal cual como viene del campo para castigar la presencia de materias extrañas que hacen bajar el PH, mientras que el PMG se realiza

sobre la muestra limpia. Por otra parte, la variedad B. Meteoro tiene similar PMG que MS 514 (Tabla 3.1) indicando que luego de la limpieza del grano, ambas variedades podrían tener un alto rendimiento harinero. Similar tendencia ha sido encontrada por diferentes autores. En muestras de trigo pan limpias, independientemente de su variedad, se ha encontrado una relación positiva y elevada entre PH y/o PMG con el rendimiento harinero (Dexter y Symons, 2007; Seghezzo, 2014).

Los valores de dureza determinados mediante el índice de tamaño de partícula o PSI por sus siglas en inglés (Particle Size Index) son mayores a 35%, por lo que las tres muestras pueden considerarse variedades de tipo "extra duro" siendo la variedad más dura la MS 514 ( $45,00 \pm 0,00\%$ ). Valores mayores de dureza se asocian a la resistencia de los granos de trigo más duros a la molienda, por lo que se espera que las partículas molidas tengan un mayor tamaño, a diferencia de los granos suaves cuyo tamaño será menor pues presentan menor resistencia a la molienda. Según describieron Abecassis y col. en 1997, la dureza no puede usarse para predecir el rendimiento total de harina, la fuerza o las propiedades reológicas de las masas, pero sí tiene influencia sobre el rendimiento de cada una de las fracciones molineras.

La Tabla 3.1 muestra también los valores de proteína en los granos siendo este parámetro elevado en todas las muestras (>13%) aunque significativamente superior en la variedad ACA 356 (Tabla 3.1). El aspecto vítreo y la textura dura del grano están fuertemente asociados con el contenido de proteína y en general se correlacionan con altos rendimientos de harina, a excepción de los granos chuzos. La importancia de la proteína es fundamental tanto desde el punto de vista nutricional como por sus efectos sobre la calidad industrial. El grano presenta una gran variabilidad de este parámetro determinada por el genotipo, el ambiente y la interacción entre ambos (Seghezzo y Molfese, 2006).

Por último, no se observaron diferencias significativas en los valores de cenizas y humedad de los granos (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1.** Caracterización de grano en variedades puras de trigo pan. Peso hectolítrico (PH) peso de mil granos (PMG), dureza, proteínas (PROT, base 13,5% Humedad), cenizas (CEN, expresado en base seca-sss-) y humedad (HUM).

Variedades	GRANO					
	PH (Kg/hl)	PMG (g)	DUREZA (%)	PROT (%)	CEN (%)	HUM (%)
<b>ACA 356</b>	79,8±0,1 b	28,0±0,9 a	40,33±1,1a	14,6±0,1 b	1,81±0,1 a	13,03±0,15 a
<b>B. Meteoro</b>	80,9±0,3 c	28,9±0,3 ab	41,67±1,1a	13,6±0,1 a	1,79±0,1 a	12,73±0,06 a
<b>MS 514</b>	75,4±0,4 a	30,3±0,4 b	45,00±0,1 b	13,6±0,1 a	1,65±0,1 a	12,67±0,06 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ). Estos resultados estarían indicando que, para las determinaciones realizadas de calidad industrial de granos, las tres variedades se comportan de manera buena a excelente para ser usadas en la industria panadera. De todas maneras, esperaríamos que la variedad B. Meteoro logre los mayores valores de rendimiento harinero, lo cual sería altamente positivo.

### 3.2. Caracterización fisicoquímica y funcional de las harinas puras

Una vez caracterizado el grano de las diferentes variedades de trigo, se molieron y se determinó el rendimiento (REND), el contenido de cenizas en la harina y la relación molinera (REL.MOL) como parámetros de la calidad industrial de los productos de molinería (Tabla 3.2). El rendimiento (REND), o sea cuanta harina se obtuvo a partir de la molienda de 100 g de grano fue estadísticamente similar entre las variedades y los valores fueron buenos (mayores a 64,0%), a pesar de haber observado diferencias en PH y PMG (Tabla 3.1).

Respecto al contenido de cenizas, se encontró que las variedades ACA 356 y B. Meteoro presentaron más cenizas que la muestra MS 514. En el caso de la relación molinera (REL.MOL), calculado como el cociente entre el rendimiento del proceso y el contenido de ceniza del producto, sí se encontraron diferencias significativas entre las tres variedades estudiadas, lo cual evidencia diferentes comportamientos durante la molienda, siendo la variedad MS 514 la que mostró una relación molinera significativamente mayor al resto de las muestras (Tabla 3.2).



**Tabla 3.2.** Caracterización de la molienda de trigo pan. Rendimiento molinero (REND), cenizas (expresado en base seca) y relación molinera (REL.MOL.).

<b>HARINA</b>			
<b>Variedades</b>	<b>REND (%)</b>	<b>CENIZAS (%)</b>	<b>REL.MOL.</b>
<b>ACA 356</b>	66,5±1,0 a	0,552±0,003 b	120±3 a
<b>B. Meteoro</b>	64,6±0,4 a	0,550±0,001 b	119±7 a
<b>MS 514</b>	65,7±2,7 a	0,452±0,016 a	147±7 b

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Cabe destacar que es importante la evaluación de diferentes parámetros físicoquímicos y funcionales en las harinas para evaluar la calidad de aptitud panadera. Uno de ellos es el color de la harina. El parámetro luminosidad  $L^*$  fue alto y varió entre 90,36 unidades (ACA 356) y 90,92 (MS 514) (Tabla 3.3). En cuanto a la variable  $a^*$  se obtuvieron valores negativos asociados al color verde mientras que el  $b^*$  fue positivo ubicándose en los tonos amarillo en las tres harinas. A pesar de las diferencias significativas, las muestras presentaron uniformidad en cuanto a los tres factores obtenidos. Montoya-López y col. (2012) determinaron el índice de blancura (IB) en harina de trigo comercial a partir de los factores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  del sistema Hunter cómo  $IB = L^* - 3b^* + 3a^*$ . Los valores de IB fueron 61,05 para ACA 356, y menores para las variedades B. Meteoro (56,75) y MS 514 (57,05). Por otro lado, se evaluó el Falling Number (FN) en las diferentes harinas que mostraron valores mayores a 400 s y no se encontraron diferencias significativas entre cultivares (Tabla 3.3), por lo que la actividad  $\alpha$ -amilásica fue similar. Estos valores se consideran normales para una campaña en la cual la cosecha se realizó bajo condiciones ambientales secas.

En la Tabla 3.3 se muestran además los resultados obtenidos del análisis de gluten, del test de sedimentación SDS y del contenido de almidón dañado. A pesar de que la variedad MS 514 presentó mayor contenido de gluten húmedo (GH), todos los valores obtenidos fueron altos (mayores a 31%), esto está en relación a los altos porcentajes de proteína de grano que fueron mostrados en la Tabla 3.1. El gluten seco (GS), como era de esperar, mostró una tendencia similar a la del GH pero sin mostrar diferencias significativas entre las variedades. El índice de gluten (IG), que indica la calidad del gluten, fue normal para trigo pan en las 3 variedades estudiadas (valores mayores a 90%). Diversos autores consideraron que valores de  $IG > 70\%$  son valores óptimos para el trigo e indican que la calidad del gluten es fuerte (Cubadda y col., 1991; Borkowska y col., 1999). Por otra parte, la prueba de sedimentación SDS determina las características de hidratación y expansión de las proteínas de gluten, lo cual está relacionado con la calidad de panificación. Los valores de SDS obtenidos también fueron altos y estadísticamente similares en las tres variedades,

esto era de esperar dado que tanto la calidad como la cantidad de gluten fueron elevadas (de la Horra y col., 2012).

Durante la molienda los gránulos de almidón sufren daños físicos, éstos absorben una mayor cantidad de agua, en algunos casos hasta un 100% de su peso, en comparación con aquellos que permanecen intactos al momento de realizar una masa. Además, los gránulos de almidón dañado son más susceptibles al ataque de las enzimas  $\alpha$ -amilasas presentes en el trigo que se activan durante la fermentación y horneado en la panificación (de la Horra y col., 2012). En nuestro caso, encontramos que la variedad ACA 356 presentó el mayor porcentaje de almidón dañado (Tabla 3.3). Debido a que la molienda de los granos de las tres variedades se procedió en el mismo molino, un mayor contenido de almidón dañado en el ACA 356 podría estar asociado a la menor dureza de grano que mostró esta variedad (40,33%; Tabla 3.1). Ponzio en 2010 observó una tendencia inversa entre las variedades trigo Buck Pronto y Klein Escudo, ésta última presentó valores de almidón dañado y de dureza más elevados.

**Tabla 3.3.** Caracterización de las harinas puras de trigo pan. Parámetros evaluados: color: L\*, a\* y b\* y Falling Number (FN). Gluten Húmedo (GH, base 14,5% humedad), Índice de Gluten (IG), Gluten Seco (GS), test de Sedimentación (SDS) y almidón dañado (ALM. DAÑADO).

HARINA				
Variedades	L*	a*	b*	FN (s)
<b>ACA 356</b>	90,36±0,1 a	-1,87±0,1 c	7,9±0,2 a	439±14 a
<b>B. Meteoro</b>	90,80±0,1 b	-2,56±0,1 a	8,8±0,1 b	417±20 a
<b>MS 514</b>	90,92±0,1 b	-2,43±0,1 b	8,9±0,3 b	432±11 a

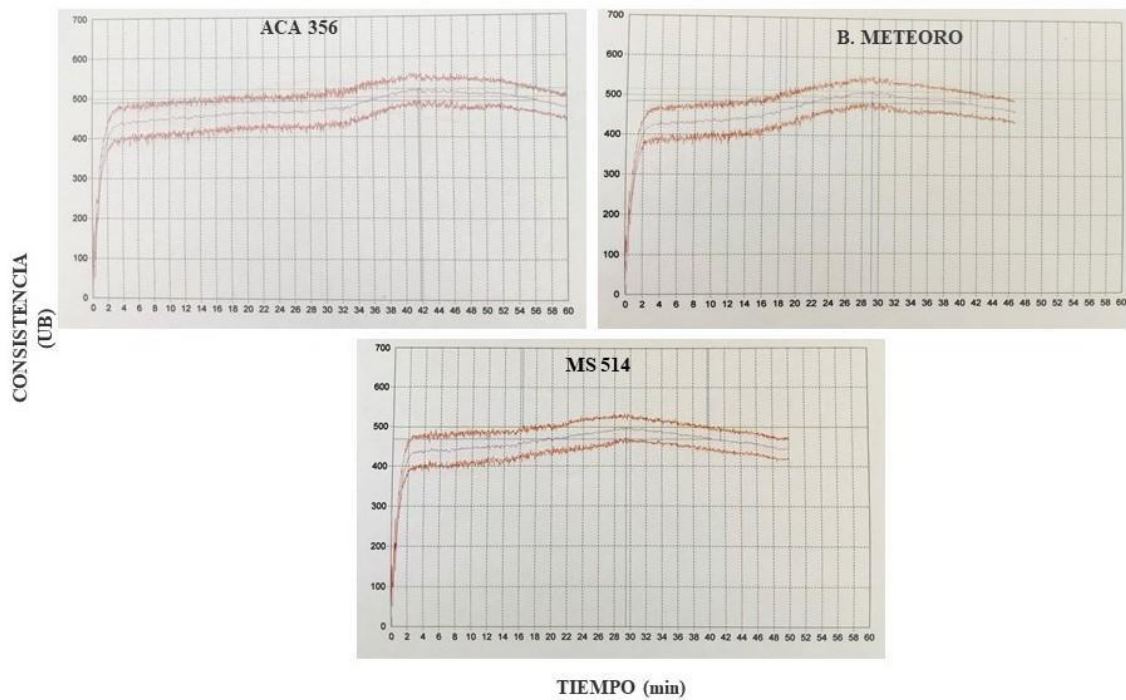
  

HARINAS					
Variedades	GH (%)	IG	GS (%)	SDS (ml)	ALM. DAÑADO (%)
<b>ACA 356</b>	31,63±0,06 a	98,7±0,6 a	11,6±0,2 a	92±3 a	7,01±0,01 b
<b>B. Meteoro</b>	31,13±0,35 a	98,7±0,6 a	11,4±0,2 a	94±2 a	5,06±0,01 a
<b>MS 514</b>	32,57±0,38 b	97,3±0,6 a	11,6±0,4 a	95±1 a	4,67±0,01 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Otra forma de evaluar la calidad panadera de la harina de trigo es mediante la caracterización reológica a través de la realización de los test físicos tales como el farinograma y el alveograma. En este sentido, los farinogramas de las tres variedades de harina de trigo se muestran en la Figura 3.1 y los parámetros obtenidos a partir de éstos se presentan en la Tabla 3.4.

En cuanto a las curvas farinográficas, podemos observar que las tres variedades mostraron dos picos de consistencia con estabilidades y tiempo de desarrollo elevados, lo cual indicaría que se van a disponer de mayores tiempos de amasado durante el proceso de panificación. Las caídas luego de alcanzar la consistencia ideal (medidas a través del aflojamiento) resultaron similares, aunque más pronunciada en el caso de la variedad MS 514.



**Figura 3.1.** Curvas farinográficas de las tres variedades puras de trigo pan: ACA 356, B. Meteoro y MS 514.

Los parámetros de absorción de agua (ABS), estabilidad (EST) y aflojamiento (AFLO) no mostraron diferencias significativas entre las variedades utilizadas (Tabla 3.4). Con respecto al tiempo de desarrollo (TD), la variedad ACA 356 fue la que tardó más tiempo en alcanzar la consistencia deseada ( $40,2 \pm 2,3$  min), siendo este parámetro significativamente mayor al resto. Esto es importante tener en cuenta al momento de la selección de la harina en la elaboración de panificados, ya que masas que tardan mucho en desarrollarse provocan mayor gasto energético sumado a que durante el amasado aumenta la temperatura teniendo consecuencias negativas en la estructura de la masa y en la actividad de las levaduras durante el proceso de panificación (Ali y col., 2012).

En la Tabla 3.4 se puede observar que la harina ACA 356 presentó el mayor número de calidad farinográfico (FQN) indicando que es la harina más fuerte estudiada. Como se observó en los parámetros descritos anteriormente la variedad ACA 356 tuvo, a comparación al resto, una mayor retención de agua y contenido de almidón dañado lo cual podría explicar este comportamiento farinográfico superior.

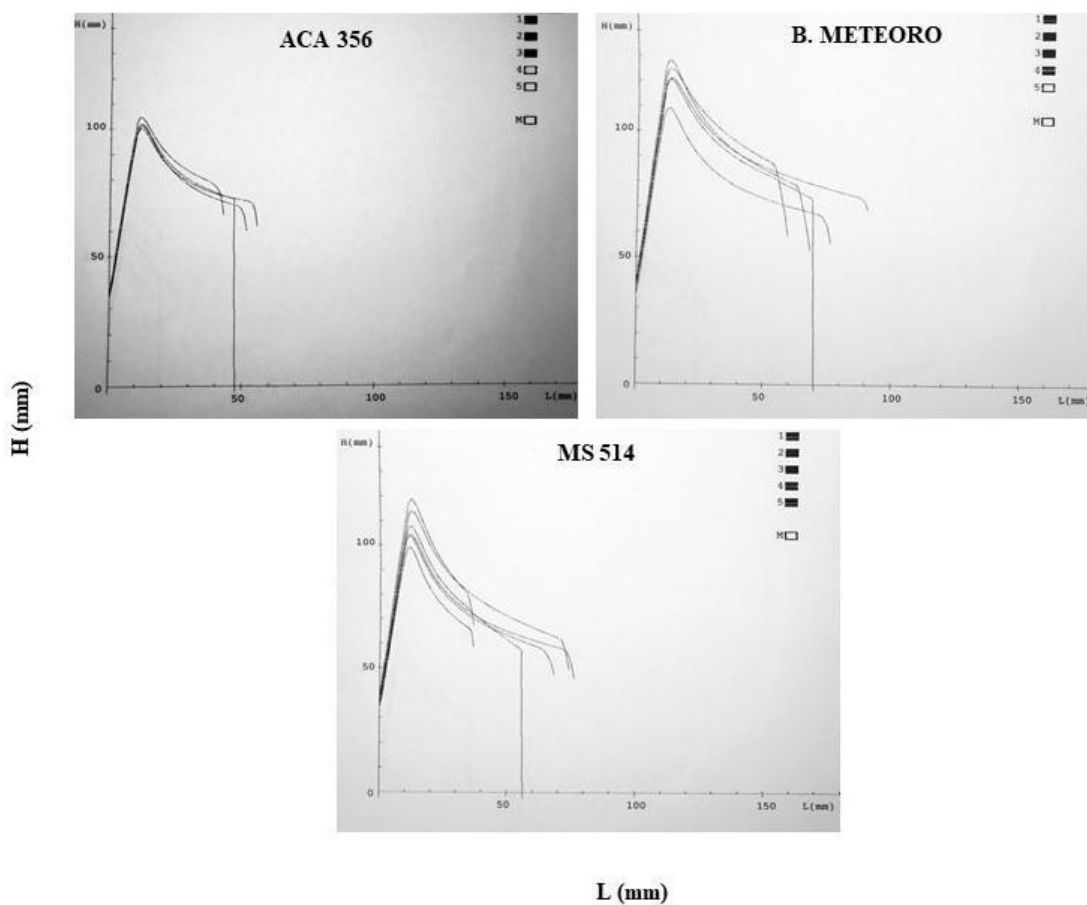
**Tabla 3.4.** Caracterización reológica de las harinas puras de trigo pan. Parámetros Farinográficos evaluados: Absorción de agua (ABS), Tiempo de desarrollo (TD), Estabilidad (EST), Aflojamiento (AFLO) y Número de calidad farinográfica (FQN).

<b>FARINOGRAMA</b>					
<b>Varietades</b>	<b>ABS (%)</b>	<b>TD (min)</b>	<b>EST (min)</b>	<b>AFLO (UB)</b>	<b>FQN (mm)</b>
<b>ACA 356</b>	59,0±0,7 a	40,2±2,3 b	25,8±0,7 a	21±1 a	546±19,0 b
<b>B. Meteoro</b>	58,7±0,6 a	27,6±3,6 a	22,6±0,1 a	26±8 a	405±14,5 a
<b>MS 514</b>	59,2±0,2 a	30,6±3,0 a	24,0±0,9 a	35±6 a	412±11,2 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Por lo tanto, en general se observó que las harinas puras estudiadas absorbieron alrededor de un 59% de agua, fueron estables mostrando elevados valores de estabilidad (EST, >14 min) y de tiempo de desarrollo (TD), con bajos valores de aflojamiento (AFLO, <35 UB), esto indicaría que son harinas fuertes aptas para soportar el esfuerzo mecánico del amasado. Pero si observamos en detalle los resultados obtenidos, podríamos decir que la variedad ACA 356 sería la menos apropiada para formulaciones de premezclas con avena, por presentar altos TD lo que implicaría un mayor gasto energético, seguida por la variedad MS 514 por tener el más alto valor de aflojamiento. De manera que la variedad con características farinográficas más equilibradas sería B. Meteoro.

A continuación, se muestran las curvas alveográficas (Figura 3.2) de las variedades puras de trigo pan. Lo más destacado es la fuerza panadera (parámetro W) que corresponde al área debajo de las curvas y es notablemente más elevado en B. Meteoro, lo cual indicaría un comportamiento sobresaliente de esta variedad. Otro punto importante para observar es la relación P/L calculada como el cociente entre el alto (tenacidad, P) y el largo (extensibilidad, L) de la curva alveográfica resulta similar y elevado en todas las variedades y estaría mostrando que las masas obtenidas fueron tenaces.



**Figura 3.2.** Curvas alveográficas de las tres variedades puras de trigo pan: ACA 356, B. Meteoro y MS 514.

La Tabla 3.5 muestra los resultados de los parámetros alveográficos obtenidos. Puede observarse que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los parámetros de tenacidad (P), extensibilidad (L) ni en el índice de hinchamiento (G) éste último valor está asociado a la extensibilidad. La fuerza panadera (W) resultó significativamente superior en las variedades MS 514 y principalmente para B. Meteoro que fue significativamente mayor que ACA 356 indicando que la harina B. Meteoro presentaría una aptitud superior para soportar los procesos de fermentación y horneado durante la panificación. No se encontraron diferencias significativas en la relación P/L en las diferentes harinas estudiadas.

**Tabla 3.5.** Caracterización reológica de las harinas puras de trigo pan. Parámetros Alveográficos evaluados: Tenacidad (P), Extensibilidad (L), Índice de hinchamiento (G), Fuerza Panadera (W); Relación P/L e Índice de Elasticidad (Ie).

<b>ALVEOGRAMA</b>						
<b>Variedades</b>	<b>P (mmH<sub>2</sub>O)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>G (mm)</b>	<b>W (Jx10<sup>-4</sup>)</b>	<b>P/L</b>	<b>Ie (%)</b>
<b>ACA 356</b>	114±17 a	48±9 a	15±1 a	250±10 a	2,5±0,8 a	74,2±1,1 b
<b>B. Meteoro</b>	125±1 a	52±12 a	16±2 a	364±41 b	2,2±0,4 a	72,8±0,7 ab
<b>MS 514</b>	133±9 a	61±5 a	17±1 a	282±5 ab	2,4±0,4 a	66,0±2,5 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Por último, el índice de elasticidad (Ie) presentó diferencias significativas entre las variedades (Tabla 3.5), siendo la variedad MS 514 la que presentó valores significativamente inferiores al resto, asociado a una caída de la curva alveográfica más pronunciada. El valor de Ie presenta una relación lineal bien correlacionada con la tenacidad, hasta valores de  $P=80$ ; y con la fuerza panadera hasta valores de  $W=200$ . Luego se alcanza un plateau, del tipo de las curvas de saturación (Monleón y Gordun, 1998). En este caso, el valor del Ie evidenciado por la variedad MS 514 estaría marcando un comportamiento alveográfico inferior, aunque significativamente similar a B. Meteoro.

Puede concluirse de este ensayo que todas fueron harinas tenaces ( $P/L > 2,0$ ) con un valor de trabajo de deformación (W) mayor a 250, por lo cual se las considera harinas fuertes, aptas para la elaboración de productos de horno fermentados tipo panificados y soportan otras fuentes vegetales si se desean emplear para mejorar el perfil nutricional del pan blanco. De todas maneras, de las tres variedades evaluadas, B. Meteoro resultó superior por dos parámetros: el valor de fuerza panadera que fue elevado, combinado con un valor de relación P/L, que, si bien fue alto, resultó más equilibrado que en el resto.

Por último, conocer el contenido de pentosanos y evaluar la retención de diferentes tipos de solventes nos permitirá complementar el estudio previo y dilucidar acerca de la calidad y funcionalidad de las diferentes harinas.

Los pentosanos son parte de la fibra dietaria y resultan de interés porque están asociados a mejoras en las propiedades reológicas de las masas de harina de trigo y en la performance durante el proceso de panificación por la gran capacidad de absorción de agua (Turnbull y Rahman, 2002;

Dupont y Altenbach, 2003 y Paesani, 2020). La Tabla 3.6 muestra la concentración de pentosanos solubles, insolubles y totales en las distintas variedades de trigo pan analizadas.

**Tabla 3.6.** Caracterización de las harinas puras de trigo pan. Contenido de pentosanos solubles, pentosanos insolubles y pentosanos totales.

Variedades	PENTOSANOS (%)		
	SOLUBLES	INSOLUBLES	TOTALES
<b>ACA 356</b>	0,88±0,13 a	2,64±0,17 a	3,52±0,16 a
<b>B. Meteoro</b>	1,01±0,04 a	2,60±0,27 a	3,61±0,26 a
<b>MS 514</b>	1,04±0,03 a	2,35±0,05 a	3,39±0,04 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

No se evidenciaron diferencias significativas entre las variedades estudiadas en ninguno de los dos tipos de pentosanos presentando las harinas alrededor de un 3,5% de pentosanos totales de los cuales alrededor del 70% son insolubles. Garnero y col. (2016) analizaron el contenido de pentosanos en distintas variedades puras de trigo pan, encontrando que los pentosanos insolubles y, por lo tanto, los totales, dependen fuertemente de la fecha de espigazón de la variedad; estableciendo que aquellas con fechas tardías resultan más promisorias en contenido de pentosanos totales. Por último, señalaron que estos componentes están asociados directamente a la fibra dietaria y a la absorción de agua de las harinas, influyendo en la selección de estas variedades cuando se destacan propiedades nutricionales y tecnológicas, respectivamente.

En nuestro caso, las tres variedades elegidas corresponden a ciclos de crecimiento intermedio-largo, de manera tal que podríamos inferir que el no haber encontrado diferencias en el contenido de pentosanos podría explicarse porque los cultivares poseen fechas de espigazón similares.

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de retención de solventes. El porcentaje de retención de cada solvente se relaciona con los componentes de la harina; de esta manera pueden compararse con patrones de comportamiento que permiten clasificar a una determinada harina por su aptitud para desarrollar ciertos productos de panificación y definir su perfil de calidad. El porcentaje de retención de sacarosa y de carbonato de sodio, se asocia directamente con el contenido de pentosanos y gliadinas y con los niveles de almidón dañado, respectivamente. La retención de ácido láctico y de agua están relacionados con la fracción del gluten correspondiente a las gluteninas y los componentes hidrofílicos (almidón dañado, proteínas totales, gluten y pentosanos solubles) presentes en la harina (de la Horra y col.,

2012). En la Tabla 3.7 puede observarse que los porcentajes de retención de sacarosa (SAC) y de carbonato de sodio (CS) no mostraron diferencias significativas entre las harinas de las variedades analizadas, esto podría estar en relación al contenido de pentosanos (Tabla 3.6), donde tampoco se encontraron diferencias entre las harinas, no así con el almidón dañado donde sí se encontraron diferencias (Tabla 3.3). El agua alcalina (AA) está asociada positivamente a la capacidad de la harina de absorber agua (Kweon y col., 2011). En este caso, en la retención de agua alcalina y de ácido láctico (AL) se encontraron diferencias significativas entre las variedades, siendo el cultivar ACA 356 el que mostró valores menores al resto, lo cual podría evidenciar una calidad panadera inferior. Por su parte, la variedad MS 514 tuvo una capacidad de retención de agua significativamente menor que el resto, lo cual indicaría una inferior capacidad de hidratación en ausencia de trabajo mecánico. Tanto lo hallado en la variedad ACA 356 como en la variedad MS 514, que estaría marcando una menor capacidad de hidratación de las harinas, no se corresponde con lo observado en la absorción farinografica, en la cual no se encontraron diferencias significativas entre las variedades (Tabla 3.4).

**Tabla 3.7** Caracterización de las harinas puras de trigo pan. Retención de solventes: sacarosa (SAC), carbonato de sodio (CS), agua alcalina (AA), ácido láctico (AL) y agua.

RETENCION SOLVENTES					
Variedades	SAC (%)	CS (%)	AL (%)	AA (%)	AGUA (%)
<b>ACA 356</b>	84,6±0,4 a	82,8±4,9 a	130±6 a	61,8±0,5 a	62,5±1,2 b
<b>B. Meteoro</b>	87,2±1,4 a	82,7±2,7 a	139±6 ab	66,7±0,1 b	63,2±1,1 b
<b>MS 514</b>	86,8±1,7 a	75,7±0,3 a	146±6 b	68,6±0,5 b	57,9±1,3 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Por todo lo estudiado hasta acá, desde la calidad industrial del grano hasta las propiedades fisicoquímicas y funcionales de las harinas puras, podemos dilucidar que la variedad pura de trigo pan B. Meteoro es la que consideramos que resultaría más adecuada para la elaboración de premezclas con avena. Respecto a este último cereal, el grano maduro posee enzimas lipasas que se activan luego de la molienda del grano, acelerando el deterioro de los lípidos en las harinas, lo cual produce enranciamiento, por lo que es importante optimizar las condiciones de inactivación de estas enzimas previo a la molienda.



### 3.3. Tratamiento térmico del grano de avena

La elevada actividad lipasa en el grano maduro de avena indica que la hidrólisis de lípidos es el proceso principal que desencadena el deterioro de los lípidos y explica en parte, la disminución en las propiedades sensoriales de las avenas procesadas durante su almacenamiento (Lehtinen y col., 2003).

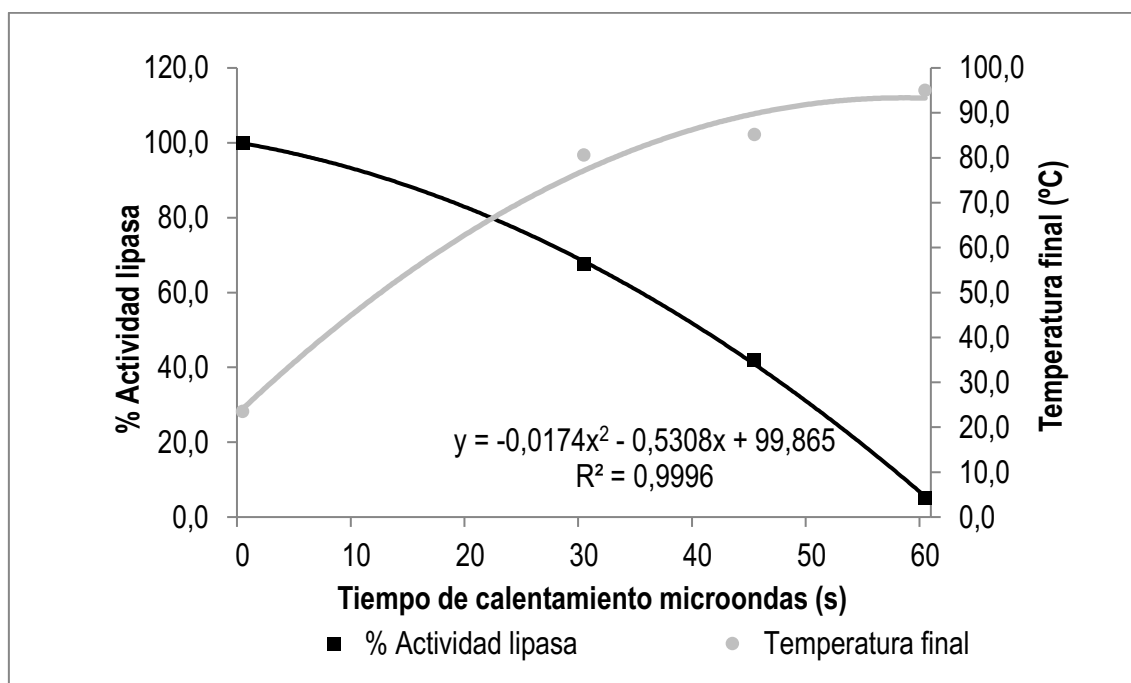
En la Tabla 3.8 se muestra la concentración de ácido oleico liberado (AOL) luego del tratamiento térmico aplicado con el fin de inactivar la enzima lipasa usando microondas a máxima potencia, el % de actividad enzimática y además se muestra la temperatura final alcanzada por los granos de avena una vez terminado el tratamiento. Los tiempos ensayados fueron: 30, 45 y 60 s, y se trabajó con una muestra control sin tratar.

Los granos de avena sin tratar térmicamente (control) presentaron mayor cantidad de AOL, por lo que se considera que la lipasa está completamente activa. Al aumentar el tiempo de tratamiento por microondas la concentración de AOL fue menor acompañado con un descenso de la actividad enzimática (Tabla 3.8, Figura 3.3). Además, la temperatura de los granos aumentó significativamente con el tratamiento. Como puede observarse, el tratamiento de 60 s fue el que resultó más efectivo y mostró una reducción en la actividad lipasa significativamente menor al resto de los tratamientos evaluados (5,1% de actividad); este resultado positivo en la inhibición parcial de la actividad enzimática coincide con una temperatura intergranaria de 95°C al final del tratamiento y con lo publicado por Keying y col (2009). Estos autores estudiaron la inhibición de la actividad lipasa utilizando microondas a máxima potencia y encontraron, luego de probar distintos tiempos de exposición, que al llegar a una temperatura intergranaria de 95°C, la inactivación estaba asegurada. Ese valor de temperatura es el que se alcanza comúnmente en la industria, en donde no se emplea microondas sino que el tratamiento térmico de inactivación de la enzima lipasa se realiza con vapor (Gutiérrez, 2018. Cereales 3 arroyos, comunicación personal).

**Tabla 3.8.** Tratamiento térmico del grano de avena. Tiempo de exposición al microondas (Tiempo); Concentración de Ácido Oleico Liberado (AOL), Actividad lipasa y Temperatura intergranaria al final del tratamiento.

Tiempo (s)	Concentración AOL ( $\mu\text{mol}/5 \text{ ml isooctano}$ )	Actividad lipasa (%)	Temperatura final (° C)
Control	113,7 $\pm$ 6,0 d	100,0	23,5
30	76,8 $\pm$ 7,6 c	67,5	80,6
45	47,6 $\pm$ 8,1 b	41,9	85,2
60	5,7 $\pm$ 2,3 a	5,1	95,0

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).



**Figura 3.3.** Porcentaje de actividad lipasa y temperatura intergranaria al final del tratamiento térmico en función del tiempo de calentamiento en microondas.

Si bien no fue medido en este trabajo, la bibliografía consultada señala que el tratamiento térmico de la avena tiene una ventaja adicional, que es la de favorecer la reacción de Maillard, esta es una reacción que se produce entre los grupos aminos como los que están presentes en las proteínas y los carbonilos de los carbohidratos, generando sabores deseables, pardeamiento de los granos y la formación de compuestos antioxidantes que contribuyen a incrementar la estabilidad de los lípidos (Decker y col., 2014). Otra ventaja es la inactivación de bacterias, hongos y levaduras que puedan estar presentes en las muestras, haciendo así, más seguro el alimento (Fellows, 2009).

Lehtinen y col. (2003) concluyeron que los tratamientos térmicos realizados con vapor y logrando temperaturas entre 90 y 130°C en granos de avena, redujeron la formación de ácidos grasos libres en las fracciones procesadas, pero provocaron que, en la fracción de lípidos polares, los ácidos grasos acilados resultaran más susceptible a la oxidación.

Schlormann y col. (2020) realizaron tratamientos térmicos a temperaturas elevadas (140-180°C) sobre grano y hojuelas de avena y evaluaron el impacto que tenían sobre las propiedades nutritivas y sensoriales. Dentro de los atributos sensoriales observaron que aquellos que definen aroma, textura, olor y apariencia se vieron mejorados con los tratamientos de temperatura, posiblemente haya sido la reacción de Maillard la responsable de estas mejoras sensoriales. Dentro de las propiedades nutricionales, destacaron que no hubo impacto sobre el contenido de proteínas, de lípidos ni de almidón. Similar tendencia fue observada por otros autores (Beloshapka y col., 2016; Hu y col., 2014). Schlormann y col. (2020) observaron una pérdida de fibra dietaria insoluble y total, como consecuencia de los tratamientos térmicos. El contenido de  $\beta$ -glucanos no resultó modificado, esto también fue citado en una revisión realizada por Wang y Ellis (2014), donde señalaron que los cambios en el contenido de  $\beta$ -glucanos están dados por el genotipo y/o por las condiciones de crecimiento del cultivo, pero no por los tratamientos térmicos a los que sea sometido el grano.

Por lo expuesto anteriormente, la inactivación de la enzima lipasa en la avena aumenta su vida útil, sin embargo, puede traer alguna modificación en sus características nutricionales, por esta razón, resulta de suma importancia realizar una evaluación de la composición nutricional de las harinas.

#### 3.4. Caracterización nutricional de las harinas de avenas y trigo de variedades puras

En la Tabla 3.9 se observa la composición porcentual de las harinas de avena puras, todos los valores están expresados sobre sustancia seca (sss).

Las harinas presentaron una humedad en un rango acotado que va desde 10,4% en la variedad Paloma INTA y 11,4% para INTA Maja. El contenido de proteína de todas las variedades analizadas resultó elevado (valores mayores a 14% sss) y superior al citado en bibliografía (Kent, 1987; Sterna y col., 2016). Lo mismo ocurre para los  $\beta$ -glucanos, que mostraron valores superiores a los citados por Sterna y col. en 2016 para pepitas de avena, estos autores mencionan una variación entre 2,96 y 3,34%. En las variedades analizadas en esta tesis los valores se encuentran entre 5,2 $\pm$ 0,1% y 3,5 $\pm$ 0,1%; esto resulta sumamente positivo dada la importancia para la salud que tienen estos componentes.

El contenido de cenizas resultó dentro de los parámetros definidos por el CAA para una harina de avena (cenizas < 2,2%) (CAA, 2023). El contenido de lípidos estuvo entre 3,0±0,2 y 5,6±0,5.

**Tabla 3.9.** Caracterización nutricional de las variedades puras de avena, parámetros presentados sobre sustancia seca (sss). Contenido de Proteína (PROT, % sss); β-glucanos (% sss); Lípidos (% sss) y Cenizas (% sss) e Hidratos de Carbono (H de C, %).

Variedades	HUM (%)	PROT (%)	LÍPIDOS (%)	CENIZAS (%)	H de C Total	
					β-GLUCANOS (%)	OTROS (%)
INTA Yapa	11,3±0,1 c	18,6±0,4 def	5,4±0,3 c	1,9±0,1 a	3,5±0,1 a	62,8
INTA Sureña	10,8±0,2b	19,3±0,7 fg	4,6±0,2	2,1±0,2 a	5,2±0,1 b	63,2
Payé INTA	10,9±0,1 b	16,4±0,1 a	5,6±0,5 c	2,0±0,1 a	4,1±0,5 ab	65,1
Paloma INTA	10,4±0,1 a	17,9±0,2 bcde	4,7±0,3 ab	2,0±0,1 a	3,8±0,1 a	65
INTA Maja	11,4±0,1 c	16,8±0,1 ab	4,3±0,5 a	1,9±0,1 a	5,3±0,5 b	65,6
Elizabeth INTA	11,2±0,1 c	19,2±0,1 efg	4,7±0,5 ab	2,2±0,1 a	3,8±0,4 a	62,7
INTA Maná	11,3±0,1 c	17,7±0,3 bcd	4,4±0,4 ab	2,1±0,1 a	3,9±0,1 a	64,5
INTA Aikén	11,2±0,3 c	18,3±0,1 cdef	3,0±0,2 a	2,1±0,1 a	4,7±0,2 ab	65,4
INTA Calén	11,4±0,1 c	18,3±0,1 defg	3,8±0,3 a	2,0±0,1 a	4,5±0,2 ab	64,5

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa (p < 0,05).

Los valores de composición porcentual de las tres harinas de trigo pan están dentro de lo esperado (Tabla 3.10). Los resultados del contenido de cenizas fueron cercanos a los de una harina tipificada según el CAA como harina 0000, siendo mayores en las variedades ACA 356 y B. Meteoro. Entre estas últimas dos variedades, a pesar de que B. Meteoro presentó menos proteína que ACA 356, los valores de proteína resultaron elevados, tal como lo habíamos anticipado al analizar la proteína de grano (Tabla 3.1). La variedad B. Meteoro presentó el mayor contenido de lípidos. No se encontraron diferencias significativas en los valores de Fibra Dietaria Total (FDT) ni en Hidratos de Carbono (H de C) diferente de fibra entre las variedades estudiadas. Los valores encontrados fueron los esperados comparado con la bibliografía (Matz, 1999).

**Tabla 3.10.** Composición porcentual de las variedades puras de trigo pan, valores expresados sobre sustancia seca. Ceniza; Proteínas (PROT); Lípidos; Fibra Dietaria Total (FDT) e Hidratos de Carbono (H de C). Datos expresados en base seca.

<b>Variedades</b>	<b>HUM (%)</b>	<b>CENIZA (%)</b>	<b>PROT (%)</b>	<b>LIPIDOS (%)</b>	<b>FDT (%)</b>	<b>H de C (%)</b>
<b>ACA 356</b>	13,46±0,01 b	0,552±0,003 b	14,94±0,1 b	1,16±0,04 b	3,02±0,21 a	80,25±0,4 a
<b>B. Meteoro</b>	13,68±0,01 c	0,550±0,001 b	14,03±0,1 a	1,29±0,01 c	2,82±0,06 a	81,23±0,1 a
<b>MS 514</b>	12,90±0,01 a	0,452±0,016 a	15,12±0,1 b	0,95±0,01 a	3,42±0,03 a	79,98±0,1 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ )

De acuerdo a la calidad nutricional de las harinas, podemos destacar que entre los trigos los parámetros nutricionales están en valores buenos, presentando B. Meteoro mayores contenidos de cenizas y lípidos. Además, esta variedad mostró ser superior en varios de los parámetros que definen la aptitud panadera de un trigo, por lo tanto, resultó la variedad elegida de trigo pan para elaborar una premezcla junto con harina de avena.

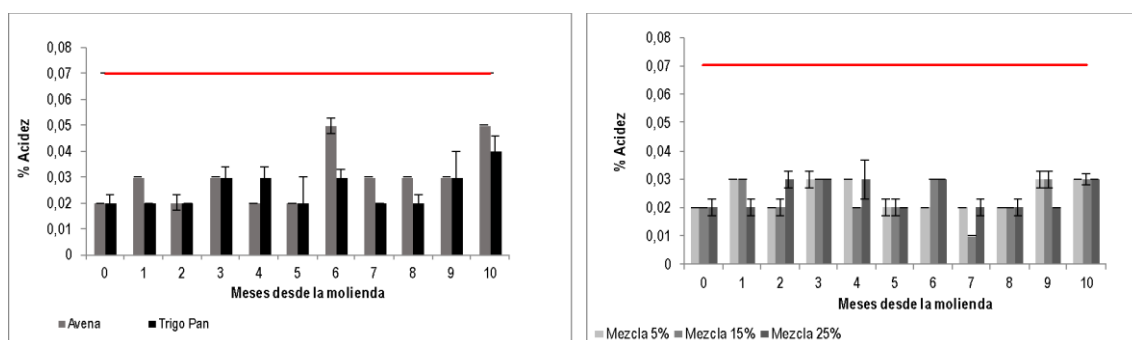
En cuanto a las variedades de avena, elegimos Bonaerense INTA Calen, primero porque es la variedad más difundida y utilizada por la industria alimenticia argentina (Wehrhahne y Gutiérrez, 2018. Comunicación personal) y además es una variedad que presentó, sino el mayor, uno de los valores de  $\beta$ -glucanos más elevados y valores relativamente altos de proteínas e intermedio de lípidos, parámetros que definen también la calidad nutricional.

Una vez definidas las variedades a utilizar de trigo y avena, resulta de interés estudiar la vida útil de los productos de molienda de cada una de ellas y de sus mezclas, para así poder completar su caracterización.

### 3.5. Evaluación de la vida útil de harinas puras y en mezcla de trigo pan y avena

La evaluación de la vida útil de las harinas resulta de suma importancia puesto que nos da idea del tiempo disponible para su uso sin que ocurra el deterioro de las características organolépticas que puedan perjudicar el producto final y provocar el rechazo por parte de los consumidores. Este análisis se llevó a cabo sobre las harinas puras y las premezclas a utilizar para la panificación posterior, de manera tal de poder evaluar el comportamiento de las harinas en la mezcla. Las mismas se realizaron con la variedad de trigo B. Meteoro y de avena Bonaerense INTA Calen, que fueron las elegidas en las secciones anteriores.

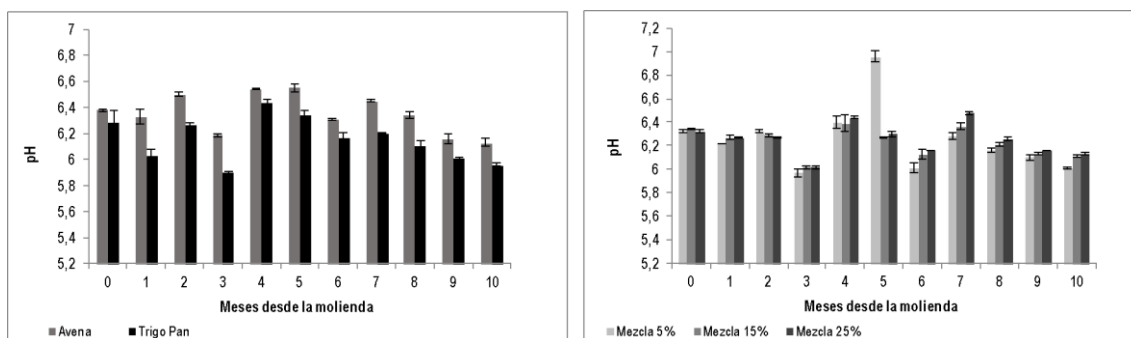
En las Figuras 3.4, se muestran los valores de porcentaje de acidez para las harinas puras y en mezcla, en función del tiempo de almacenamiento, que fue de 10 meses, tomando como cero el día de molienda.



**Figura 3.4.** Porcentaje de acidez de las harinas puras de avena y trigo pan y de las premezclas de harina de trigo y avena, al 5, 15 y 25%, en función del tiempo, tomando como tiempo 0 el día de molienda. La línea roja marca el valor límite descrito por el Codex Alimentarius (2020).

Según el límite establecido por el Codex Alimentarius (2020), los valores de acidez tanto en las harinas puras como en las mezclas resultaron normales (menores a 0,07%). En las harinas puras, llegados los 10 meses de almacenamiento se evidencia un leve aumento, pero sin llegar a exceder el límite mencionado anteriormente. A su vez, la harina pura de trigo pan mostró valores de acidez inferiores a los de la harina de avena en casi todos los meses de medición.

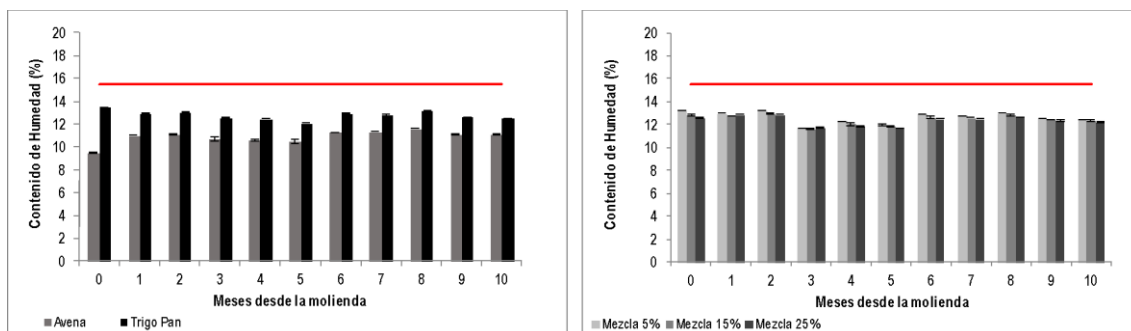
En la Figura 3.5 se muestran los valores de pH para las harinas puras y en mezclas.



**Figura 3.5.** Valores de pH de las harinas puras de avena y trigo pan y de las premezclas de harina de trigo y avena, al 5, 15 y 25%, en función del tiempo, tomando como tiempo 0 el día de molienda.

En el caso del pH, si bien el Codex Alimentarius no especifica límite, todos los momentos de muestreos presentaron valores entre 5,9-6,9 y podrían considerarse como alimentos de baja acidez (Chagman y Huamán, 2010). El trigo pan presentó valores de pH menores que la harina de avena. Esta última tendría componentes que tienden a mantener el pH en casi todo el período de almacenamiento en valores superiores a 6,2. Para las mezclas, independientemente del porcentaje de harina de avena, se lograron valores intermedios entre los de las dos harinas.

Por último, se midió el contenido de humedad de las muestras durante los 10 meses de almacenamiento y los resultados se muestran en la Figura 3.6.



**Figura 3.6.** Contenido de humedad de las harinas puras de avena y trigo pan y de las premezclas de harina de trigo y avena, al 5, 15 y 25%, en función del tiempo, tomando como tiempo 0 el día de molienda. La línea roja marca el valor límite descrito por el Codex Alimentarius (2020).

Cuando evaluamos el contenido de humedad de las muestras, observamos que siempre estuvieron en valores de humedad debajo del 15,5% (límite propuesto por el Codex Alimentarius, 2020) con lo cual la humedad tampoco estaría marcando deterioro durante los meses de almacenamiento.

Tanto en las harinas puras como en las mezclas, los resultados de los parámetros evaluados muestran que, desde el punto de vista de la vida útil, es seguro el almacenamiento por 10 meses a temperatura ambiente.



## CONCLUSIONES PARCIALES

En este capítulo se llevó a cabo el análisis de la producción y la caracterización de harinas puras de trigo pan y avena. Así como también la evaluación de la vida útil de las harinas puras y de las mezclas.

Luego del análisis de calidad de grano de las variedades puras de trigo pan, podemos afirmar que los tres materiales tuvieron buena performance, con resultados excelentes en lo que hace a peso y proteína de grano, parámetros de importancia por su elevada correlación con la calidad molinera e industrial. Con respecto a las propiedades de hidratación, medidas a través de la retención de distintos tipos de solventes, podemos decir que la que mostró resultados más estables y superiores fue B. Meteoro. Dentro de las pruebas reológicas, el análisis alveográfico de las variedades mostró que, nuevamente la variedad B. Meteoro, tuvo mejor comportamiento determinado por una mayor fuerza alveográfica y un menor valor de P/L que estaría señalando la presencia de una masa más equilibrada. La caracterización nutricional de estas harinas fue muy similar, sin diferencias relevantes para mencionar.

La evaluación de los tratamientos térmicos en avena, con el objetivo de reducir al mínimo la actividad lipasa y así preservar las características de los productos de molienda, que luego serán utilizados en la elaboración de panificados, mostró resultados satisfactorios con 60 segundos de exposición a microondas logrando en este caso temperaturas intergranarias similares a las obtenidas en la industria y una actividad enzimática significativamente inferior y aceptable. De esta manera, se logró ajustar un protocolo de trabajo, no sólo para el tratamiento térmico sino también para la determinación de la actividad lipasa de las muestras.

En cuanto a la calidad nutricional de las variedades de avena argentinas, se pudo observar que los valores de contenido de proteína resultaron elevados y mayores a los citados en bibliografía. Los valores de contenido de ceniza, fibra dietaria y lípidos fueron similares a los observados en bibliografía. Los  $\beta$ -glucanos mostraron, en todas las variedades, valores superiores a lo descrito en la bibliografía consultada. Este componente es uno de los de mayor importancia en la avena y con el cual este cultivo realizaría un aporte diferencial a los productos de panificación. Fueron varias las variedades con contenido de  $\beta$ -glucanos significativamente superiores (valores mayores a 4%), dentro de la cual se ubicó la variedad Bonaerense INTA Calen que, a su vez, corresponde al material más utilizado en la industria argentina de avena.

Luego de analizar este capítulo y teniendo en cuenta lo detallado anteriormente, usaremos de acá en adelante como variedad de trigo pan Buck Meteoro y como variedad de avena a Bonaerense INTA Calen.

Respecto al análisis de vida útil de harinas puras y en mezclas, podemos concluir que, durante 10 meses de almacenamiento, no hubo evidencias de pérdida de vida útil según los indicadores utilizados y los límites definidos por el Codex Alimentarius.

**CAPÍTULO IV**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**  
**PREMEZCLAS Y MASAS**

## 4- RESULTADOS Y DISCUSIÓN. PREMEZCLAS Y MASAS

### 4.1. Caracterización de las premezclas

En esta sección veremos algunas de las características funcionales de las mezclas con 5, 15 y 25% de harina de avena (Bonaerense INTA Calen) en comparación con la muestra control (100% harina de trigo pan, variedad Buck meteoro) con el fin de evaluar cómo se comportan estas harinas en la mezcla.

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados de la evaluación de retención de solventes. Los parámetros de retención de: agua alcalina (AA), agua y carbonato de sodio (CS) mostraron valores significativamente mayores en las mezclas de 15 y 25% respecto a control; esto evidenciaría una mejor aptitud para la panificación. En cambio, la retención de sacarosa (SAC) fue estadísticamente similar en las muestras estudiadas a diferencia del ácido láctico (AL) que mostró diferencias significativas entre las premezclas y la harina de trigo pura, siendo significativamente mayor en esta última. La retención de los solventes que aumentó en las premezclas con mayor contenido de avena Bonaerense INTA Calen presenta una importante relación positiva con los compuestos hidrofílicos presentes, de acuerdo con lo propuesto por de la Horra y col. (2012); esto podría estar atribuido al aporte de estos tipos de compuestos presentes en la harina de avena, tales como proteínas y fibra soluble como los  $\beta$ -glucanos.

**Tabla 4.1.** Caracterización de las premezclas de harina de trigo con avena al 5, 15 y 25% y la harina control (100% harina de trigo). Retención de solventes: agua alcalina (AA); agua; carbonato de sodio (CS); sacarosa (SAC) y ácido láctico (AL).

RETENCION DE SOLVENTES					
MUESTRAS	AA (%)	AGUA (%)	CS (%)	SAC (%)	AL (%)
Control	68±2 a	63,2±1,1 a	82,7±2,7 a	88,6±4,4 a	139±6 b
Mezcla 5%	74±2 a	65,3±0,6 ab	96,8±3,4 b	93,1±0,3 a	122±1 a
Mezcla 15%	86±4 b	68,9±1,5 b	101,5±0,2 bc	94,9±2,5 a	119±4 a
Mezcla 25%	87±1 b	69,3±2,5 b	106,8±0,5 c	93,3±1,0 a	112±2 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Luego de haber evaluado las características funcionales de las premezclas, elaboraremos las masas a partir de dichas formulaciones, utilizando parámetros optimizados con el objetivo de lograr una masa que esté en condiciones óptimas para la fabricación posterior de panificados.

#### 4.2. Formulación de las masas

A continuación, en la Tabla 4.2, se muestra la formulación de cada masa. En todos los casos se utilizó una cantidad fija de harina de trigo y se le adicionó el porcentaje correspondiente de harina de avena en cada mezcla. Se utilizó un 1,5% de sal y, la cantidad de agua adicionada y el tiempo de amasado fue fijado según los resultados farinográficos que presentaremos a continuación. En dicha tabla queda registrada la temperatura de la masa alcanzada al final del amasado.

**Tabla 4.2.** Ingredientes en la formulación de las masas utilizadas para medir comportamiento reológico. Identificación de las muestras: Control (100% Harina de trigo pan); Mezclas (base harina de trigo): Mezcla 5% (Harina de trigo pan + 5% Harina de avena); Mezcla 15% (Harina de trigo pan + 15% Harina de avena); Mezcla 25% (Harina de trigo pan + 25% Harina de avena). Harina de trigo (HAR. TRIGO); sal (SAL), harina de avena (HAR. AVENA), absorción de agua del farinógrafo (ABS), contenido de agua adicionado (AGUA), tiempo de desarrollo (TD) y temperatura de la masa al final del amasado (TFA).

MUESTRAS	HARINA		HARINA	ABS (%)	AGUA (ml)	TD (min)	TFA (°C)
	TRIGO (g)	SAL (g)	AVENA (g)				
<b>Control</b>	450	6,75	-	61,30	275,8	31,13	23,7
<b>Mezcla 5%</b>	450	6,75	22,5	62,00	279,0	29,15	21,5
<b>Mezcla 15%</b>	450	6,75	67,5	64,20	288,9	24,75	22,4
<b>Mezcla 25%</b>	450	6,75	112,5	66,20	297,9	25,30	23,5

Como puede observarse en la Tabla 4.2, a medida que agregamos más cantidad de harina de avena a la mezcla, la absorción farinográfica y, por lo tanto, el agua a adicionar aumenta. Esto es porque la avena no se comporta como un inerte, lejos de eso, sus componentes absorben más agua y la masa necesita menos tiempo para el desarrollo óptimo de la red de gluten.

Una vez formuladas las masas, se realiza un análisis reológico de estas mezclas que nos ayuda a conocer los manejos tecnológicos que se deben realizar para lograr el panificado óptimo.

#### 4.3. Comportamiento reológico de las masas

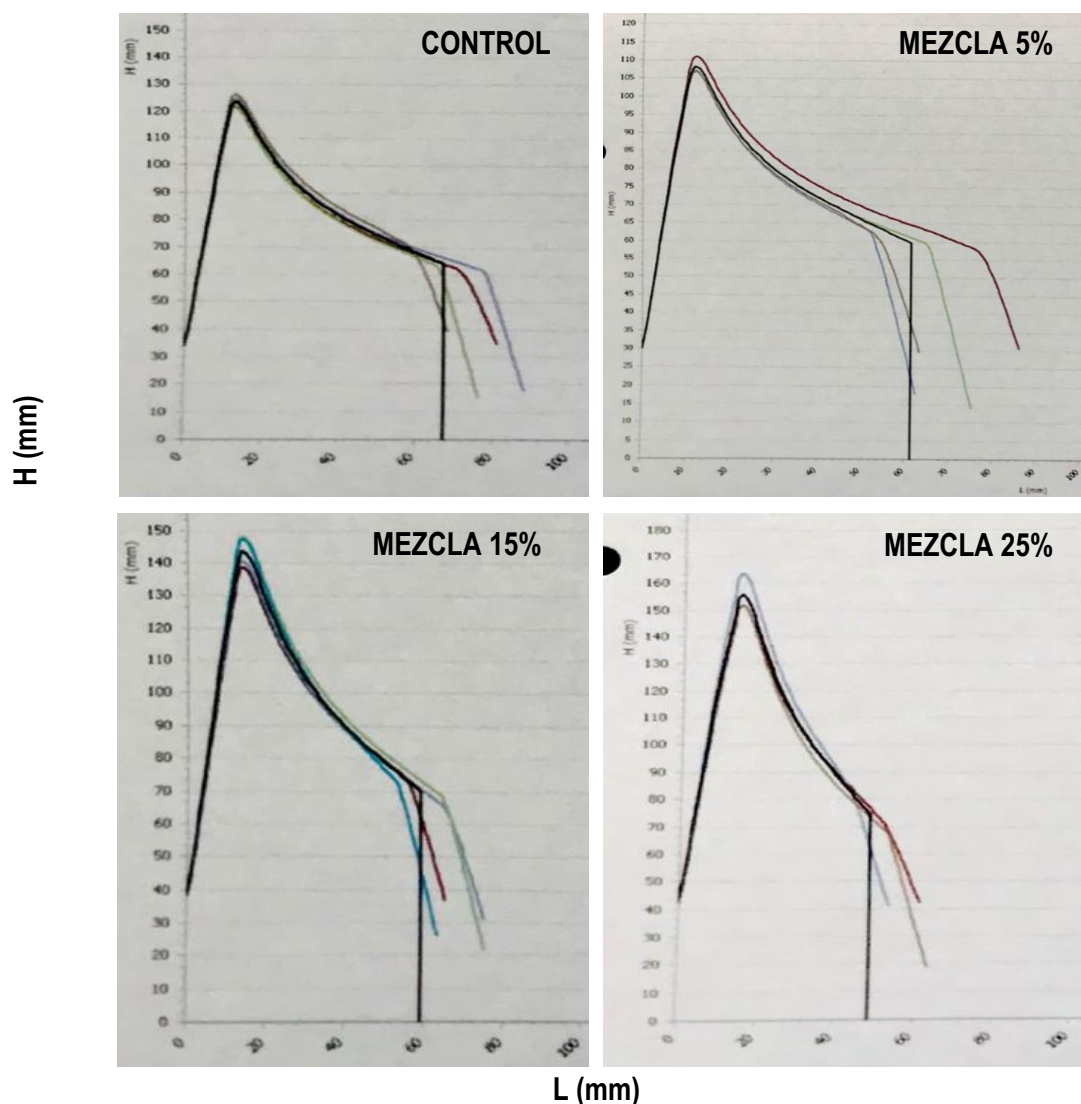
Las características reológicas de las masas son de gran importancia para poder desarrollar productos a base de cereales con la calidad tecnológica deseada. En las masas de trigo, el gluten

tiene una importancia fundamental puesto que le confiere propiedades elásticas y de extensibilidad a la misma que permiten su maquinado y la posterior expansión durante la fermentación y horneado para dar lugar a la miga. Es por ello que resulta importante caracterizar el comportamiento reológico de las masas al incorporar nuevos ingredientes en las formulaciones y poder realizar los cambios necesarios para facilitar el procesamiento y la obtención de productos de buena calidad. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos reológicos realizados con masas compuestas por harina de trigo y de avena en diferentes proporciones.

#### 4.3.1. Análisis alveográfico

Los alveogramas obtenidos para la harina de trigo pura (control) y para las mezclas con harina de avena en distintas proporciones (5%, 15% y 25%), se muestran en la Figura 4.1. En todos los casos se agregó a la formulación 1,5% de NaCl.

La Figura 4.1 muestra que el agregado de 5% de harina de avena no modifica sustancialmente el alveograma, pero una mayor proporción (15%) aumenta el P y disminuye el L. Con 25% esa variación se acentúa aún más. Esto sugiere que la fibra aportada por la avena produce masas más tenaces y menos extensibles.



**Figura 4.1.** Alveogramas típicos obtenidos para la harina de trigo pura (control) y cada una de las mezclas con avena: 5%; 15% y 25%. Donde H indica el alto de la curva en mm y L la longitud en mm.

En la Tabla 4.3 se muestran los valores obtenidos para cada parámetro alveográfico y se puede evidenciar que, a medida que aumenta el porcentaje de adición con harina de avena, aumenta significativamente la tenacidad de la masa (P) y disminuye su extensibilidad (L); con el consecuente aumento de la relación P/L. La fuerza alveográfica (medida a través del parámetro W), no presentó diferencias significativas por el agregado de avena. Por lo que podemos afirmar que no se vio perjudicada la fuerza de la masa, pero sí su tenacidad, obteniendo masas más duras. Popa y col. (2012) encontraron que la adición de avena provoca algunos problemas tecnológicos como es la disminución de la extensibilidad por efecto del alto contenido de fibra dietaria total, esto coincide con lo hallado y descrito anteriormente para este trabajo. Este comportamiento se debe

probablemente a la alta viscosidad de los  $\beta$ -glucanos (Londono y col., 2015). Estos autores han estudiado el papel de estos carbohidratos en la calidad tecnológica de las masas con y sin trigo encontrando que las propiedades elásticas de la masa de avena adicionada con gluten de trigo se veían afectadas negativamente con el aumento en el contenido de  $\beta$ -glucanos y atribuyeron este efecto desfavorable a la concentración y viscosidad conferida por los  $\beta$ -glucanos, ya que utilizando una menor cantidad de los glucanos de bajo peso molecular y de menos viscosos contrarrestó el efecto negativo.

El índice de hinchamiento (G) muestra diferencias significativas entre la muestra control y la premezcla 25%, siendo esta última significativamente menor lo cual estaría indicando que la masa sería más dura y estaría en relación a lo observado en el aumento de la tenacidad. El parámetro “le” resultó significativamente más bajo cuanto mayor fue el porcentaje de avena en la mezcla, esto marca una caída de la curva alveográfica cada vez más pronunciada, que puede verse claramente en la Figura 4.1 y estaría indicando una menor aptitud panadera. Finalmente, el W40, que indica la fuerza panadera de la muestra en el momento en que es sometida a 40 mm de presión, muestra una tendencia similar al W pero con valores que resultaron ser significativamente diferentes entre las premezclas y entre éstas y el control, siendo mayor a medida que el contenido de avena aumenta en la mezcla. Con estos resultados, volvemos a remarcar que si bien la fuerza panadera no parecería verse disminuida, las masas resultaron cada vez más duras o tenaces producto de la incorporación de avena en porcentajes crecientes.

**Tabla 4.3.** Caracterización reológica de las premezclas de harina de trigo y avena, al 5, 15 y 25% y de la harina control (100% harina de trigo), todas con un 1,5% de sal. Parámetros Alveográficos evaluados: Tenacidad (P); Extensibilidad (L); Índice de hinchamiento (G); Fuerza Panadera (W); Relación P/L; Índice de Elasticidad (le) y Fuerza panadera a la presión de 40 mm (W40).

MUESTRAS	ALVEOGRAMA						
	P (mmH <sub>2</sub> O)	L (mm)	P/L	W (Jx10 <sup>-4</sup> )	G (mm)	le (%)	W40 (Jx10 <sup>-4</sup> )
<b>Control</b>	136±2 b	67±8 b	2,0±0,3 a	380±35 a	18,2±1,1 b	66,3±0,8 c	251±5 b
<b>Mezcla 5%</b>	119±2 a	61±11 ab	2,0±0,3 a	310±54 a	17,2±1,6 ab	67,0±0,9 c	221±5 a
<b>Mezcla 15%</b>	158±5 c	59±6 ab	2,7±0,3 a	383±33 a	17,0±1,0 ab	62,9±1,6 b	288±8 c
<b>Mezcla 25%</b>	171±7 d	48±5 a	3,6±0,6 b	344±14 a	15,4±0,8 a	57,2±1,8 a	302±12 c

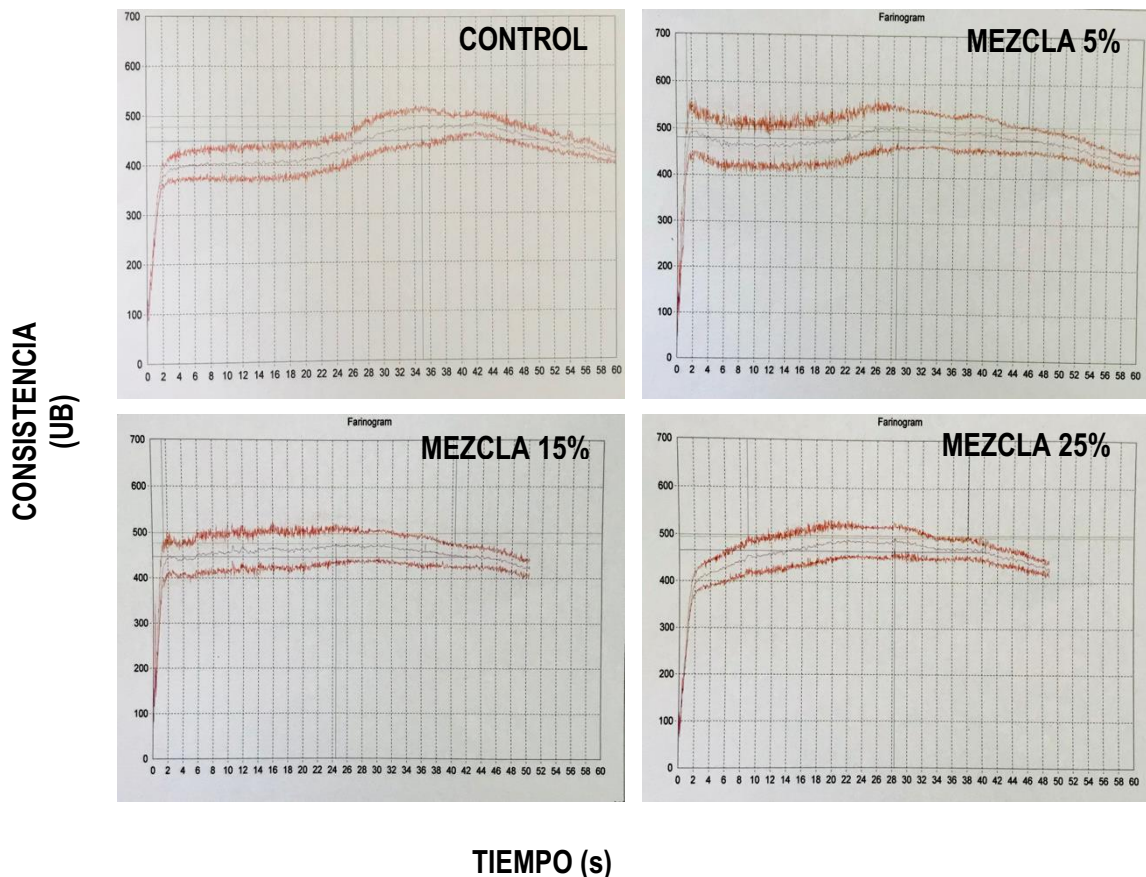
Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).



#### 4.3.2. Análisis farinográfico

La Figura 4.2, muestra los farinogramas correspondientes a la muestra control (100% harina de trigo) y a cada una de las mezclas con harina de avena en proporciones de 5%; 15% y 25%. En todos los casos se agregó 1,5% de NaCl.

En la Figura 4.2., correspondiente a la muestra control, puede observarse un farinograma típico de harina de trigo. Con un pico de elevada consistencia, asociado al desarrollo óptimo de la red de gluten. Al incorporar un 5% de avena, se pueden observar dos picos, el primero menos pronunciado que el segundo, relacionado con la hidratación de los componentes de la mezcla (Figura 4.2 Mezcla 5%). En los farinogramas correspondientes a las mezclas de 15 y 25% pueden observarse estabilidades elevadas y caídas en la consistencia más pronunciadas al aumentar el porcentaje de adición de harina de avena. Se observa también un cambio en la forma de la curva respecto a la mezcla 5%, desaparece, principalmente a 25%, el mínimo o caída de la curva que se evidencia entre el 1º y 2º pico. Esto es producto de la competencia por el agua entre los dos tipos de harinas. La harina de avena capta mayor cantidad de agua a través de los grupos hidrofílicos (hidroxilos) de los  $\beta$ -glucanos y otros hidratos de carbono, como también de las proteínas de avena, dejando al agua menos disponible para las proteínas de gluten de trigo, conduciendo a un cambio en la forma de la curva del farinograma.



**Figura 4.2.** Farinogramas típicos obtenidos para la harina de trigo (control) y cada una de las mezclas con avena: 5%, 15% y 25%.

En la Tabla 4.4 se detallan los valores obtenidos para cada parámetro farinográfico analizado. Podemos observar que las cualidades de la masa mejoran notablemente por la adición de harina de avena. La absorción de agua (ABS%) para llegar a la consistencia ideal (500 UB) de la masa es significativamente superior a medida que el porcentaje de adición de avena aumenta, esto coincide con lo reportado por diferentes autores (Zhang y col., 1998; Gibiński y col., 2010; Gambús y col., 2011, Litwinek y col., 2021). Podría ser atribuido a un mayor contenido de proteínas en las harinas mezclas respecto al control, como vimos en el Capítulo III, la avena contenía valores altos de proteína. Así como también debido al elevado contenido de fibra dietaria total que naturalmente posee la avena, aproximadamente 8% vs 4% en trigo (Gambus y col., 2011; Popa y col., 2012; Yujuan y col., 2022).

El tiempo de desarrollo (TD) asociado al tiempo en que las masas llegan a la consistencia ideal no varió por la adición de harina de avena, pero en todos los casos fue elevado (> 24 min), este es el tiempo que dispondrá el panadero para mezclar los ingredientes adecuadamente. El periodo de tiempo en el cual la masa se mantiene en la consistencia ideal es la estabilidad, la cual tampoco

mostró diferencias estadísticas entre las formulaciones, en todos los casos fueron estabilidades que se deberían considerar excelentes para panificación (todas > 28 min) (Tabla 4.4). Por último, el aflojamiento (AFLO), que mide cuantas UB cae la curva desde la consistencia ideal, disminuyó a medida que la cantidad de avena en la formulación aumentó. Comúnmente, para las harinas de trigo pan, a medida que la estabilidad farinográfica aumenta, el grado de aflojamiento disminuye; en este caso ocurre lo contrario, la estabilidad de la masa disminuye o se mantiene casi constante sin variaciones de importancia y el aflojamiento es cada vez menor; esto resulta positivo pensando en aptitud panadera y está marcando la presencia de algunos componentes (proteínas y  $\beta$ -glucanos, entre otros) en la avena que generan dicha relación. Todo esto muestra que la adición de avena afecta en forma positiva a la reología de la masa. Según Zhang y col. (1998), el alto contenido de  $\beta$ -glucanos podría ser responsable del aumento en la absorción de agua y de las mejoras observadas durante el amasado. Diferentes autores, que estudiaron porcentajes de adición de avena de entre 5 y 25%, también reportaron un aumento en la absorción de agua por la incorporación de avena durante el amasado. Esta capacidad está determinada principalmente por la presencia, en la estructura de la fibra, de un gran número de grupos hidroxilo que interactúan con el agua a través de enlaces de hidrógeno (Gibinski y col., 2010; Gambus y col. 2011; Popa y col. en 2012; Rieder y col. en 2012 y Mis y col., 2012). En contraposición a lo encontrado en este trabajo, Mis y col. (2012) evaluando panes con adición de avena de entre 5 y 25%, obtuvieron mayores valores de estabilidad farinográfica, lo cual fue atribuido a la estructura de la fibra presente en la avena.

Por último, el número de calidad farinografico (FQN) fue estadísticamente similar en las formulaciones ensayadas.

**Tabla 4.4.** Caracterización reológica de las premezclas de harina de trigo y avena, al 5, 15 y 25% y de la harina control (100% harina de trigo), todas con un 1,5% de sal. Parámetros Farinográficos evaluados: Absorción de Agua (ABS); Tiempo de Desarrollo (TD); Estabilidad (EST); Aflojamiento (AFLO) y Número de Calidad Farinográfica (FQN).

<b>FARINOGRAMA</b>					
<b>MUESTRAS</b>	<b>ABS (%)</b>	<b>TD (min)</b>	<b>EST (min)</b>	<b>AFLO (UB)</b>	<b>FQN (mm)</b>
<b>Control</b>	62,4±0,31 a	31,1±0,9 a	35,9±6,3 a	46±7 c	435±18 a
<b>Mezcla 5%</b>	62,5±0,28 a	29,2±0,6 a	43,1±1,5 a	29±2 bc	456±23 a
<b>Mezcla 15%</b>	64,6±0,35 b	24,8±0,3 a	36,4±3,7 a	16±6 ab	445±24 a
<b>Mezcla 25%</b>	66,7±0,07 c	25,3±4,4 a	28,7±0,6 a	8±5 a	403±20 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Las mejoras evidenciadas mediante los alveogramas y farinogramas en las mezclas estudiadas, también fueron encontradas por Flander y col. (2007), por Gambus y col. (2011) y por Rieder y col. (2012); dichos autores las atribuyeron al alto contenido de fibra de la avena, especialmente al de fibra soluble, que modificaría positivamente el desarrollo de la red de gluten, dándole mayor consistencia. Djordjevic y col. en 2022 señalaron que masas con fibra dietaria de harina de avena aumentaron la consistencia y la viscosidad de la masa, debido al entrelazamiento de cadenas de celulosa y hemicelulosa óptimamente hidratadas que se originaron de las fibras predominantemente insolubles añadidas.

El análisis farinográfico entrega información del comportamiento de la harina durante el amasado, mientras que el alveógrafo, una vez realizada la masa, brinda información acerca de la capacidad de esa masa formada de extenderse por efecto del insuflado de aire, simulando la formación de CO<sub>2</sub> (g) durante la fermentación, etapa previa a la cocción y fijación de la matriz de la miga del pan.

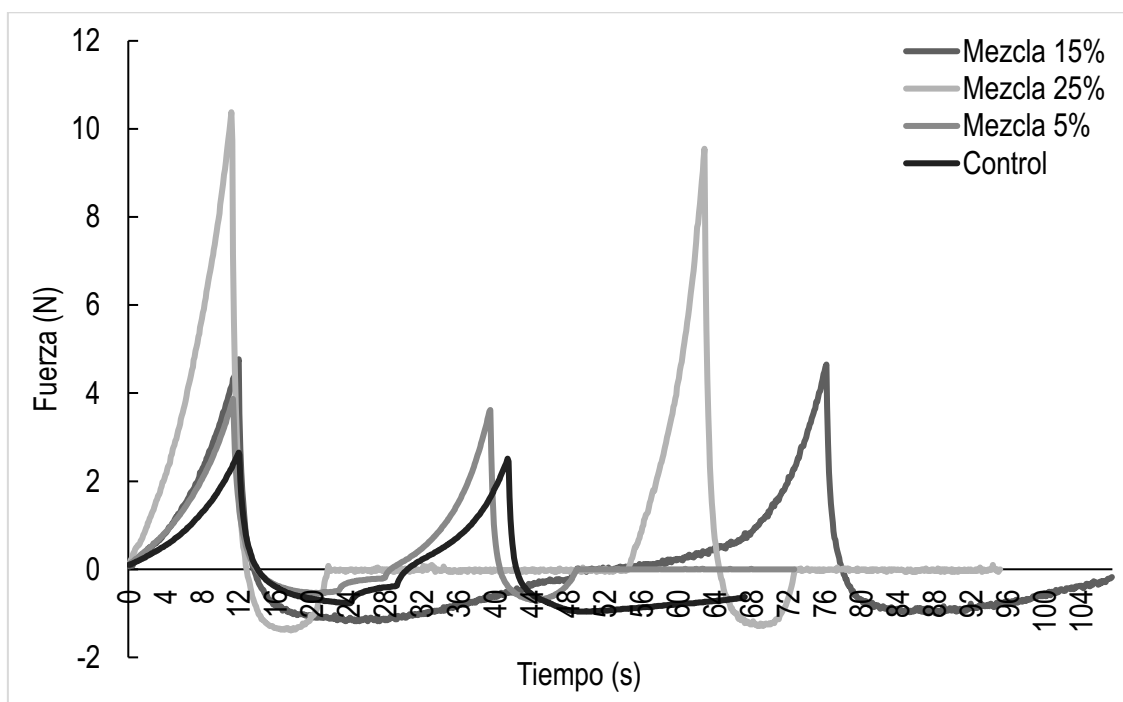
Otros tipos de ensayos, también en condiciones de grandes deformaciones, analizan diferentes parámetros reológicos relacionados con la estructura de la red de gluten una vez formulada la masa, y cómo responde esa red a la aplicación de diferentes esfuerzos y deformaciones. Por ello, para completar el análisis de la reología de las masas es necesario analizar la textura y relajación de las mismas empleando un texturómetro, que permitirá cuantificar esos otros parámetros de importancia reológica.

#### 4.3.3. Análisis de perfil de textura

La masa es un material viscoelástico muy sensible a la deformación. Cuando ésta se somete a fuerzas externas, los entrecruzamientos físicos y los enlaces químicos débiles que sostienen los constituyentes de la masa se pueden romper y reorganizar, permitiendo su relajación parcial o completa (Masi y col., 1998). El comportamiento macroestructural de la masa depende de su composición, del arreglo espacial entre sus componentes, de los tipos de enlaces existentes. Los estudios sobre la textura y la reología de la masa definen la influencia de diversos componentes, permite el control de la calidad del producto final y orienta el diseño y la adaptación de nuevas tecnologías de procesos (Rodríguez-Sandoval y col., 2005).

La Figura 4.3 muestra los perfiles de textura típicos para las masas evaluadas. Como puede observarse, la muestra control es la que menores valores de dureza presenta a los distintos tiempos de ensayo, en contraposición, la mezcla con agregado de 25% muestra valores de fuerza

elevados. A su vez, el segundo pico se presenta, en el caso de las mezclas 15 y 25% corridos respecto al tiempo en que ocurren para el control y la mezcla 5%.



**Figura 4.3.** Perfiles de textura típicos para las masas: control (100% harina de trigo pan) y para cada una de las mezclas: 5, 15 y 25% harina de avena.

En la Tabla 4.5 se observan los parámetros obtenidos a partir del análisis de perfil de textura de las diferentes masas. Se evidencia claramente el incremento de la dureza de la masa a medida que el porcentaje de harina de avena aumenta, pasando de 2,7 N (masa control) a 10,9 N en la masa 25%. La consistencia mostró un aumento significativo con el aumento del contenido de avena, siguiendo la misma tendencia que la dureza; lo mismo ocurrió para la elasticidad. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Bigne y colaboradores en 2021, quienes vieron aumentos en dureza y elasticidad de las masas, por la sustitución de la harina de trigo con hasta un 20% de harina de garbanzo. La cohesividad no mostró una tendencia marcada, la gomosidad mostró el mismo comportamiento que la dureza, pasando de valores de 2,1 N en el control a 7,3 N en la masa con mayor contenido de avena. Esto resulta opuesto a lo encontrado por Hager y Wolter en 2012. Estos autores estudiaron y compararon masas de pan elaboradas con distintos cereales puros, la comparación de la masa 100% avena vs 100% trigo mostró una mayor dureza en esta última y señalaron propiedades viscoelásticas superiores en las masas elaboradas con 100% harina de avena.

La adhesividad disminuyó significativamente con el agregado de harina de avena (Tabla 4.5), esto significa que la fuerza necesaria para despegar el émbolo de la superficie de la masa fue cada vez menor. Otros autores han informado aumentos en la adhesividad de las masas por incorporación de harinas ricas en fibra y proteínas: harina de soja (Ribotta y col., 2005) y harina de garbanzo (Mohammed y col., 2012), lo cual sería contrario a lo encontrado en este trabajo. Evidentemente la naturaleza química de los componentes de la harina de avena aumenta la absorción de agua de la harina formando una masa más dura y menos adhesiva. Se trata de moléculas altamente hidrofílicas ( $\beta$ -glucanos y otros) capaces de formar uniones puente hidrógeno fuertes con el agua. Esto significa que el agua está adsorbida a dichos componentes e incorporada a la matriz de gluten, sin capacidad de migración hacia la superficie de la masa.

**Tabla 4.5.** Parámetros obtenidos a partir del análisis de perfil de textura a las masas: control (100% Harina de trigo pan); Mezcla 5% (Harina de trigo pan + 5% Harina de avena); Mezcla 15% (Harina de trigo pan + 15% Harina de avena); Mezcla 25% (Harina de trigo pan + 25% Harina de avena).

<b>ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA DE LAS MASAS</b>						
<b>MUESTRAS</b>	<b>DUREZA (N)</b>	<b>COHESIVIDAD (-)</b>	<b>GOMOSIDAD (N)</b>	<b>CONSISTENCIA (N*s)</b>	<b>ELASTICIDAD (N*s)</b>	<b>ADHESIVIDAD (N*s)</b>
<b>Control</b>	2,7±0,3 a	0,79±0,02 b	2,1±0,2 a	21,6±1,4 a	0,90±0,01 a	7,8±0,8 b
<b>Mezcla 5%</b>	3,8±0,2 b	0,79±0,02 b	3,0±0,2 b	30,1±1,8 b	0,91±0,01 a	9,1±1,3 c
<b>Mezcla 15%</b>	5,5±0,5 c	1,05±0,13 c	5,8±0,7 c	41,8±0,9 c	1,53±0,30 b	1,2±0,1 a
<b>Mezcla 25%</b>	10,9±0,8 d	0,67±0,03 a	7,3±0,8 d	50,0±1,6 d	2,75±0,05 c	1,2±0,1 a

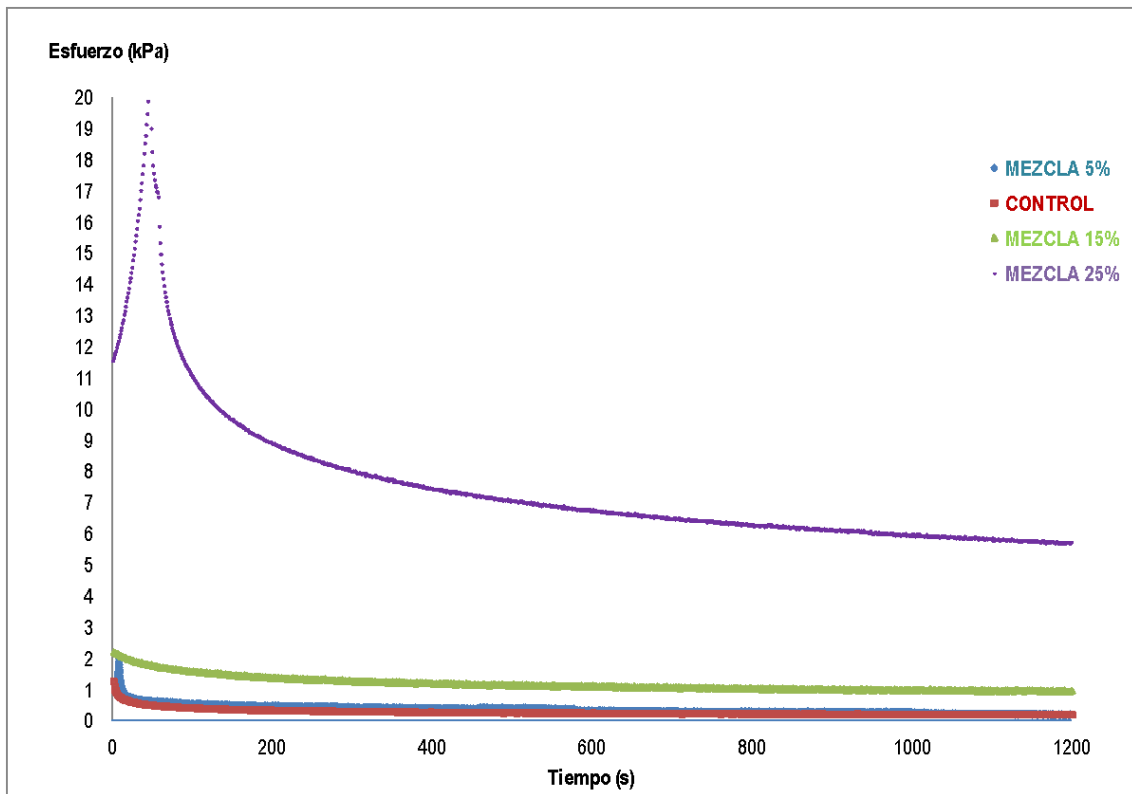
Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

#### 4.3.4. Ensayos de relajación

Para masas obtenidas a partir de harinas de trigo con diferente performance tecnológica Lopes-da-Silva y col. (2007) asignaron diferencias en la movilidad molecular de las matrices de proteína/agua a diferencias en la rigidez de la red. Los ensayos de relajación han sido utilizados previamente por diferentes autores para complementar el estudio de las propiedades reológicas de las masas (Rodríguez-Sandoval y col., 2009; Correa y col., 2010). En los sólidos viscoelásticos como las masas el esfuerzo decae hacia un valor de equilibrio. De acuerdo a Yadav y col. (2005), las curvas de relajación exhiben tres zonas: una primera de gran pendiente, luego una de decaimiento intermedia y una tercera de pendiente insignificante que alcanza un valor de esfuerzo

de equilibrio. La relajación es un fenómeno relacionado con la reorientación molecular y estructural del sistema.

La Figura 4.4 muestra el gráfico obtenido de esfuerzo en función del tiempo para las formulaciones estudiadas. En general, el comportamiento de relajación de la masa puede ser descrito a través de dos procesos: una relajación rápida (al inicio: entre 0,1-10 s), la cual está asociada a moléculas pequeñas que se relajan más rápido, y un proceso lento (de 10 a 10.000 s) relacionada con la relajación de los polímeros de alto peso molecular que comprenden el gluten (Dobraszczyk y Morgenstern, 2003 y Li y col., 2003). Estos valores de los rangos de relajación pueden modificarse con el tipo de masa a estudiar. Puede observarse que la masa control fue la que más se relajó. Cuando se agregó 5% de avena a la formulación, la curva casi no mostró diferencias de esfuerzo respecto a la muestra 100% harina de trigo pan. Con 15% de avena adicionada se produjo un leve aumento en el esfuerzo inicial. Por último, la mezcla con 25% de avena mostró valores de esfuerzo al inicio muy elevados respecto a las demás masas evaluadas. La incorporación de un alto nivel de avena provocó el registro de un gran esfuerzo y al relajar, la curva de relajación estuvo por encima de las otras formulaciones, asociada a una mayor energía almacenada, coincidente con una alta dureza registrada en el análisis de perfil de textura.



**Figura 4.4.** Curvas de relajación obtenidas con el texturómetro de las masas: control (100% Harina de trigo pan); Mezcla 5% (Harina de trigo pan + 5% Harina de avena); Mezcla 15% (Harina de trigo pan + 15% Harina de avena); Mezcla 25% (Harina de trigo pan + 25% Harina de avena).

Para poder cuantificar el efecto de la avena en el comportamiento viscoelástico de las masas, se aplicó sobre las curvas observadas en la Figura 4.4 el modelo de Maxwell generalizado para obtener los parámetros tales como el módulo elástico  $E$  y el módulo de relajación  $T$ , los cuales nos permiten estudiar esta orientación estructural de los componentes en la masa.

El tiempo de relajación ( $T$ ) es inverso al módulo elástico ( $E$ ) y está relacionado con el grado de relajación ( $T_i = \eta_i / E_i$ ), a mayor  $T$ , mayor es el componente viscoso con respecto al elástico y más se relaja la masa.  $E_1$  y  $T_1$  gobiernan la relajación al comienzo de la deformación, que se atribuye a la orientación de las moléculas de bajo tamaño, mientras que  $E_2$  y  $T_2$  (zona intermedia) representan la relajación de las moléculas poliméricas. Como al principio la masa se relaja en mayor proporción,  $T_1$  en general es mayor que  $T_2$ . Si el esfuerzo no cambia con la deformación alcanzando el equilibrio, predomina el término  $E_3$  el cual representa la energía almacenada.

Tal como puede observarse en la Tabla 4.6, todas las masas presentaron valores de orden mayor de  $E_2$  comparados a los módulos  $E_1$  y  $E_3$ . Esto sugiere que las proteínas poliméricas del gluten que se relajan en la zona 2, representada por  $E_2$ , están contribuyendo en gran medida a la



elasticidad de la masa. En la masa con 25% avena se observa que todos los módulos ( $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$ ) resultaron significativamente mayores al resto de las mezclas, sugiriendo la formación de una masa muy elástica. Estos resultados coinciden con lo citado por Bigne y colaboradores en 2021, quienes estudiaron mezclas de harina de trigo con hasta un 20% de harina de garbanzo.

**Tabla 4.6.** Módulos elásticos (E) y tiempos de relajación (t) las masas: control (100% Harina de trigo pan); Mezcla 5% (Harina de trigo pan + 5% Harina de avena); Mezcla 15% (Harina de trigo pan + 15% Harina de avena); Mezcla 25% (Harina de trigo pan + 25% Harina de avena).

MUESTRAS	$E_1$ (kPa)	$E_2$ (kPa)	$E_3$ (kPa)	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)
<b>Control</b>	0,34±0,03 a	2,79±0,39 a	0,09±0,01 a	275±16 a	7,9±0,6 b
<b>Mezcla 5%</b>	0,48±0,04 ab	6,50±0,59 a	0,14±0,06 a	533±1 c	4,2±0,2 a
<b>Mezcla 15%</b>	0,60±0,07 b	3,40±0,51 a	0,58±0,10 b	258±23 a	10,0±2,0 b
<b>Mezcla 25%</b>	3,42±0,14 c	31,11±7,29 b	2,20±0,17 c	318±55 b	8,4±2,2 b

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Además del análisis de la reología de las masas (control y premezclas), también es importante cuantificar algunos parámetros que definen las propiedades de hidratación de las mismas para así lograr una caracterización más completa.

Para remarcar lo visto anteriormente, la capacidad de absorción de agua que genera la avena en las masas está determinada principalmente por la presencia, en la estructura de la fibra, de un gran número de grupos hidroxilo que interactúan con el agua a través de enlaces de hidrógeno (Mis y col., 2012). Además, se observó que el contenido de proteína de la avena utilizada era elevado y según bibliografía la avena es el único cereal que posee una proporción más elevada de globulinas que de prolaminas y gluteninas, 80% y 20%, respectivamente (Yujuan y col., 2022); esto podría estar interfiriendo en las características reológicas analizadas. Janssen y col. en 2018 estudiaron la fase acuosa de las masas elaboradas con harina de trigo, de centeno, de cebada y de avena y encontraron que, en esta última, el alto contenido de lípidos y la baja tensión superficial de su fase acuosa indicaba una interface dominada por lípidos, lo que podía explicar la estructura heterogénea de la miga de los panes de avena y que, el alto contenido de lípidos en la avena puede desempeñar un papel en la estabilización de las células de gas en la masa.

#### 4.4. Evaluación de las propiedades de hidratación de las masas

El agua en los alimentos se puede encontrar libre, ligada o interaccionando con los macrocomponentes, cuanto mayor sea el valor de disponibilidad de agua, mayor va a ser el agua libre y menor va a ser la interacción de ésta con los componentes de la masa. La Tabla 4.7 muestra que la actividad de agua ( $a_w$ ) fue de 0,978 para la masa del control y para el resto de las formulaciones también resultó elevada y estadísticamente similar ( $> 0,979$ ). Esto indica que estas masas son sistemas con alta disponibilidad de agua y que la adición de harina de avena no modifica esta propiedad.

En cuanto a la humedad de la masa, puede observarse que la masa control contiene un 55,17% de agua, y fue significativamente superior al encontrado en el resto de las formulaciones. Además, a medida que se incorporó mayor cantidad de harina de avena en la formulación, el contenido de humedad disminuyó. Esta relación fue inversa a la observada con la absorción farinográfica, atribuida al alto contenido de fibra presente en la harina de avena. Las masas con avena forman evidentemente una matriz que necesita mayor cantidad de agua que se une a proteínas de trigo y de avena y a los diferentes componentes hidrofílicos como los  $\beta$ -glucanos, pentosanos, fibra soluble e hidratos de carbono solubles en general. Como la humedad de la masa con avena resultó mucho menor que la de trigo, es evidente que el exceso de agua pasó a formar parte de lo que se conoce como agua ligada, no está libre y por eso no se puede determinar por calentamiento, está estructuralmente unida a los diferentes componentes hidrofílicos antes mencionados, es agua constitucional que contribuye a la estructuración de la matriz de la masa.

**Tabla 4.7.** Actividad acuosa ( $a_w$ ) y contenido de humedad (%) en las masas evaluadas: control (100% Harina de trigo pan); Mezcla 5% (Harina de trigo pan + 5% Harina de avena); Mezcla 15% (Harina de trigo pan + 15% Harina de avena); Mezcla 25% (Harina de trigo pan + 25% Harina de avena).

MUESTRAS	$a_w$	HUMEDAD (%)
Control	0,978 $\pm$ 0,001 a	55,17 $\pm$ 0,085 d
Mezcla 5%	0,979 $\pm$ 0,002 ab	43,98 $\pm$ 0,032 c
Mezcla 15%	0,981 $\pm$ 0,001 b	42,54 $\pm$ 0,161 b
Mezcla 25%	0,981 $\pm$ 0,001 ab	41,48 $\pm$ 0,055 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

De lo expuesto podemos decir que, en lo que hace a la hidratación de las masas, la actividad acuosa no presentó diferencias significativas entre las premezclas a pesar de que el contenido de humedad fue cada vez más bajo con la incorporación de cantidades crecientes de harina de avena. Este comportamiento, junto con la mayor cantidad de agua absorbida por efecto de la avena, evidencia una conversión de agua libre en agua ligada que se convierte en componente constitucional de la matriz polimérica de la masa. Wang y col. (2017) evaluaron los efectos de la incorporación de  $\beta$ -glucano de avena (entre 1% y 5%) en las propiedades de hidratación de la masa con harina de trigo. Observaron, como en nuestro caso un aumento de la absorción de agua farinográfica de la masa suplementada con alto porcentaje de esta fibra soluble comercial proveniente de avena. Para estos autores, el agua está menos ligada y más inmovilizada que en la masa de trigo ya que podría estar unida a la fibra soluble, y menos disponible para el desarrollo de la red de gluten.

## CONCLUSIONES PARCIALES

En la evaluación de las premezclas se observó un aporte positivo de componentes hidrofílicos por parte de la harina de avena a través del análisis de la retención de solventes en las distintas mezclas.

La harina de avena, hasta cierto nivel, no fue un impedimento para la formación de la red de gluten en una masa panaria, sin embargo, el alto contenido de fibra dietaria total de la harina de avena estaría conduciendo a cambios en los atributos texturales de la masa, probablemente como consecuencia de un desarrollo diferente de la red de gluten.

El comportamiento reológico de las masas, evaluado a partir del alveógrafo mostró que la adición de avena tuvo un efecto importante en la tenacidad de las masas, obteniendo masas cada vez más tenaces.

La cantidad de agua resulta un parámetro crítico en la obtención de masas compuestas de trigo-avena con características adecuadas para la panificación y, en este sentido, el ensayo con el farinógrafo fue una metodología útil para determinar los niveles de agua óptima. Este ensayo logró detectar un comportamiento inverso al observado comúnmente para harinas de trigo pan: a medida que se adicionó harina de avena a la mezcla, la estabilidad farinográfica y el aflojamiento disminuyeron.

La evaluación de las propiedades reológicas a través del texturómetro también mostró incrementos importantes en dureza y gomosidad de la masa, sin cambios significativos en la cohesividad es decir, no se produjo disrupción de la red de gluten, o mejor dicho, los nuevos componentes se adaptaron contribuyendo a la formación de una nueva red de gluten que mantiene su cohesividad. Hubo una tendencia marcada a la disminución de la adhesividad a la superficie por el agregado de avena producto de la incorporación del agua como componente estructural, pasando del estado libre (estado de alta energía) a ligado (estado de baja energía), disminuyendo su capacidad de difusión y migración hacia la superficie de la masa.

Los ensayos de relajación permitieron observar que el agregado de avena a la harina de trigo pan provocó importantes aumentos del esfuerzo; en el caso de la mezcla 25% este aumento resultó 10 veces mayor respecto al control.

**CAPÍTULO V**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**  
**PANES**

## 5- RESULTADOS Y DISCUSIÓN. PANES

### PANES CON TRIGO PAN

En el capítulo anterior evaluamos todo lo referido a las masas de las premezclas con distintas proporciones de trigo pan y avena. Vimos que había cambios en las masas de las mezclas respecto a las elaboradas con 100% harina de trigo. A continuación, vamos a evaluar cuál fue el impacto en los panificados.

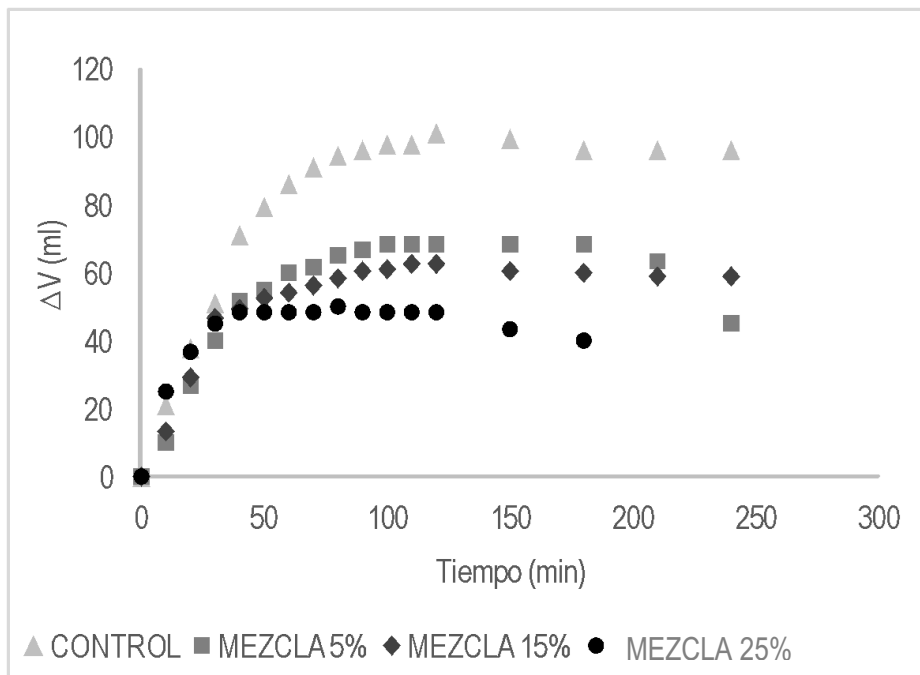
#### 5.1. Optimización del tiempo de fermentación

Se realizaron las curvas de fermentación de todas las masas para evaluar el comportamiento frente al leudado de las mismas y determinar el tiempo óptimo de fermentación, según se describió en el Capítulo II (Materiales y Métodos).

Las curvas de fermentación obtenidas experimentalmente (incremento de volumen en función del tiempo) de la masa control y de las masas con 5, 15 y 25% de harina de avena, se muestran en la Figura 5.1.

Se puede observar que el agregado de harina de avena origina curvas con diferente volumen de masa respecto al control. La masa control aumentó en mayor proporción el volumen que las masas elaboradas con agregado de harina de avena, alcanzando estas últimas un plateau a menores tiempos de fermentación.

Los parámetros obtenidos de la ecuación de Chapman para la curva de fermentación obtenida experimentalmente permiten interpretar matemáticamente el comportamiento de las diferentes zonas de las curvas de fermentación observadas en la Figura 5.1. Recordando del Capítulo 2,  $\Delta V$  (parámetro a) es el incremento de volumen de masa (ml), t el tiempo del ensayo (min),  $V_{max}$  el volumen máximo ocupado por la masa (ml), el parámetro b es la constante de velocidad de aumento de volumen de masa ( $\text{min}^{-1}$ ) y  $t_f$  el tiempo de fermentación que es el tiempo que tarda la masa en alcanzar  $\frac{3}{4} V_{max}$  (min). El parámetro c está relacionado con el punto de inflexión y la forma de la curva.



**Figura 5.1.** Curvas de fermentación típicas obtenidas a partir de la masa control y de las masas con distintas proporciones de harina de avena (Mezclas 5, 15 y 25%).

A continuación, en la Tabla 5.1, se presentan los parámetros cinéticos obtenidos del ensayo de fermentación. El parámetro *a* (volumen máximo) de la masa de trigo fue el mayor y muestra una disminución con el aumento del agregado de harina de avena independientemente del porcentaje agregado. El parámetro *b*, que está relacionado con la velocidad de fermentación, fue significativamente mayor en la masa con un 25% de harina de avena adicionada a la harina de trigo pan. Finalmente, el parámetro *c*, relacionado con el punto de inflexión y la forma de la curva no mostró diferencias significativas entre las masas. Estos resultados podrían atribuirse al aporte de fibra dietaria total que hace la harina de avena, lo cual interferiría con la matriz de gluten, afectando sus propiedades viscoelásticas que son necesarias para la expansión de la masa, la retención de dióxido de carbono y la formación de alvéolos (Guardianelli y col., 2022).

**Tabla 5.1.** Parámetros cinéticos obtenidos del ensayo de fermentación de la masa: a (cm<sup>3</sup>), b (min<sup>-1</sup>) y c. Para mas muestras: Control (100% Harina de trigo pan); Mezcla 5% (Harina de trigo pan + 5% Harina de avena); Mezcla 15% (Harina de trigo pan + 15% Harina de avena); Mezcla 25% (Harina de trigo pan + 25% Harina de avena).

MUESTRAS	FERMENTACIÓN		
	a (cm <sup>3</sup> )	b (min <sup>-1</sup> )	c
<b>Control</b>	98,72±12,8 b	0,04±0,01 a	1,81±0,6 a
<b>Mezcla 5%</b>	64,90±3,3 a	0,06±0,01 a	2,46±0,6 a
<b>Mezcla 15%</b>	60,32±3,5 a	0,06±0,01 a	1,79±0,4 a
<b>Mezcla 25%</b>	47,39±12,5 a	0,11±0,03 b	2,10±1,2 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa (p < 0,05).

Los tiempos de fermentación, calculados según la fórmula descrita en el Capítulo 2 (Ecuación 2.22), arrojaron los siguientes valores: 44,5 min (Control), 36,9 min (Mezcla 5%), 33,5 min (Mezcla 15%), 17 min (Mezcla 25%). Un comportamiento similar fue hallado por De Erive y col., 2020 quienes adicionaron fibra soluble de avena con alto contenido de beta-glucanos (70%), en proporciones de 10, 12 y 14% en masas de trigo pan. Estos autores encontraron que las masas con alto contenido de fibra no se expandían lo suficiente durante la fermentación, indicando una producción insuficiente de dióxido de carbono debido a la ausencia de suficiente agua para mantener la actividad metabólica normal de las levaduras y/o por la pobre capacidad de la masa de pan de producir gas.

Podemos inferir que la presencia de harina de avena disminuyó los tiempos de fermentación; esto sería deseado para el proceso de panificación debido a que acorta los tiempos en la elaboración de los panes siendo deseable para la industria y/o los panaderos, aunque el volumen de masa fermentada resultó considerablemente menor, a casi la mitad con 25% de avena, lo que podría llegar a resultar también en un menor volumen de pan.

## 5.2. Evaluación de la calidad panadera

Los panes se obtuvieron según el protocolo detallado en el Capítulo 2, luego se procedió al análisis de diferentes parámetros de calidad. La Figura 5.2 muestra imágenes de los panes obtenidos. Los resultados de los ensayos de calidad se describirán a continuación, los mismos resultan de suma importancia al momento de generar un nuevo producto de panificación. Uno de ellos es el impacto visual que tendrá el mismo por parte de los consumidores (Figura 5.2).





**Figura 5.2.** Aspecto de los panes con harina de trigo y avena.

### 5.2.1. Volumen específico

Los resultados de volumen específico para los panes obtenidos se muestran en la Tabla 5.2. Como era de esperar, de acuerdo a los resultados de fermentación de masa, la adición de harina de avena generó un descenso significativo en el volumen específico de pan. El pan control tuvo un valor de VE de  $3,8 \pm 0,4 \text{ cm}^3/\text{g}$ ; la mezcla con 5% de avena mostró una disminución del 18%, la mezcla 15% disminuyó un 37% y la mezcla con 25% de avena mostró una caída en el VE del 40%. Debe tenerse en cuenta que durante la etapa de fermentación el leudado continúa en los primeros minutos del horneado (hasta la inactivación de las levaduras), y por ello las diferencias de volumen se acentúan en el producto terminado.

**Tabla 5.2.** Volumen Específico (VE) de los panes: Control (100% Harina de trigo pan); Mezcla 5% (Harina de trigo pan + 5% Harina de avena); Mezcla 15% (Harina de trigo pan + 15% Harina de avena); Mezcla 25% (Harina de trigo pan + 25% Harina de avena).

MUESTRAS	VE ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )
<b>CONTROL</b>	$3,8 \pm 0,4$ c
<b>MEZCLA 5%</b>	$3,1 \pm 0,3$ b
<b>MEZCLA 15%</b>	$2,4 \pm 0,1$ a
<b>MEZCLA 25%</b>	$2,3 \pm 0,2$ a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Varios autores han mencionado el efecto que provoca la adición de harinas diferentes a la de trigo, aislados proteicos o fibra en el VE de pan. Pueden mencionarse, entre estos a Ribotta y col. (2005), Fenn y col. (2010) y Llumiquinga Chuqui (2022); quienes al incorporar legumbres encontraron disminuciones en el volumen específico de los panes. También Mohammed y col. (2012) cuando

estudiaron panificados con el agregado de harina de garbanzo (hasta en un 30% de la mezcla) observaron disminuciones en el volumen de pan. Litwinek y col. (2021) evaluaron mezclas 50:50 de harina de avena: harina de trigo pan encontrando una disminución significativa en el VE de los panes y lo asociaron a una baja en el volumen absoluto del pan ya que el peso de las piezas no fue significativamente diferente. Este comportamiento lo atribuyeron a la mayor retención de agua durante la preparación de la masa. Otros autores, también observaron un decrecimiento en el volumen de pan por la adición de avena en más de un 30% a una harina de trigo pan, atribuyendo esto a la diferente composición y tamaño de partícula de la harina de avena (Krochman-Marczal y col., 2020). En otro sistema, Salinas y col. (2015) evaluaron el efecto de la incorporación de dos harinas de algarrobo europeo, pulpa y germen, a harina de trigo hasta un 30% de adición. Estos autores encontraron una mayor reducción en el volumen de los panes cuando se incorporó harina de pulpa (con contenidos de fibra dietaria total de 45%) respecto a los panes con incorporación de harina de germen (con 55,7% de proteínas) de dicha leguminosa, lo cual les permitió inferir que el detrimento en la calidad del producto es mayor con la incorporación de ciertos componentes (fibra) por sobre otros.

Cabe aclarar que todos los autores antes mencionados coincidieron en que las pérdidas de volumen se atribuían al efecto de dilución sobre las proteínas de gluten y/o a la disrupción de la red de gluten ocasionada por los nuevos componentes.

Rieder y colaboradores en 2012 también estudiaron panes con agregado de harina de avena en proporciones de entre 5 y 25% y encontraron disminuciones significativas en el volumen de pan y, en consecuencia, aumentos también en la firmeza de la miga. La diferencia con nuestro trabajo radica en que en esta tesis se trabajó con variedades de avena de INTA de alto contenido de  $\beta$ -glucanos cuyo comportamiento panadero debía analizarse en profundidad.

La avena contiene el doble de fibra dietaria que el trigo pan y el 65% corresponde a fibra dietaria insoluble (Yujuan y col., 2022). Según mencionan Djordjevic y col., en 2022, la fibra dietaria insoluble muestra una influencia negativa en el valor de volumen de pan debido a sus propiedades de hidratación. En nuestro caso, el contenido de fibra dietaria total de la avena Calen fue determinado y contiene un  $10,98 \pm 0,45\%$ , cuatro veces más que la del trigo.

### 5.2.2. Color de corteza

El color de la corteza es un atributo importante al momento de la elección del pan por parte del consumidor, colores muy claros o muy oscuros no son deseables. El índice de pardeamiento (IP), es un parámetro que se calcula teniendo en cuenta los tres valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  obtenidos por medio

del colorímetro, el cual se encuentra relacionado con la coloración marrón de la corteza. Este color es característico de la corteza que aparece como consecuencia de la reacción de pardeamiento no enzimático entre grupos carbonilos disponibles como los que se encuentran en los hidratos de carbono reductores y los grupos aminos libres pertenecientes a residuos aminoacídicos como la lisina de las proteínas (reacción de Maillard).

En la Tabla 5.3 se observan los IP de la corteza de los diferentes panes en estudio. Como la temperatura y tiempo de horneado fue igual para todos los tipos de pan, podemos inferir que el cambio en la coloración es debido a los ingredientes de cada formulación, o sea, a la cantidad de harina de avena adicionada

**Tabla 5.3.** Color de corteza en los panes, según Índice de pardeamiento (IP): Control (100% Harina de trigo pan); Mezcla 5% (Harina de trigo pan + 5% Harina de avena); Mezcla 15% (Harina de trigo pan + 15% Harina de avena); Mezcla 25% (Harina de trigo pan + 25% Harina de avena).

<b>MUESTRAS</b>	<b>IP-Corteza</b>
<b>CONTROL</b>	64±9 c
<b>MEZCLA 5%</b>	65±11 c
<b>MEZCLA 15%</b>	50±6 b
<b>MEZCLA 25%</b>	45±6 a

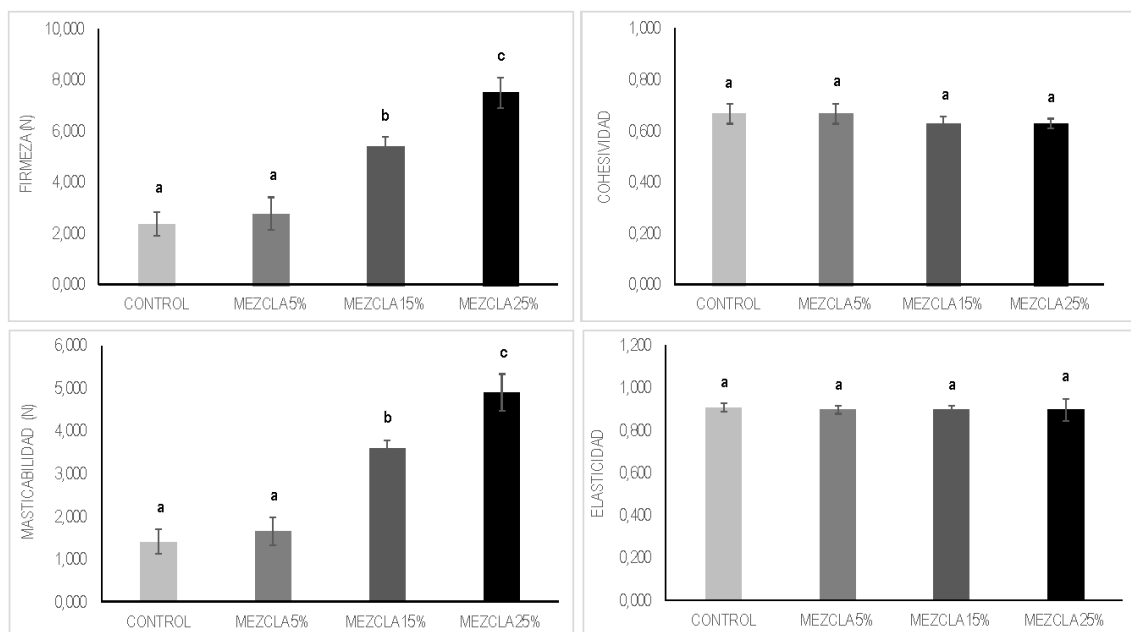
Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Entre los panes control y mezcla 5% no se observaron diferencias significativas para el valor de IP, y estos fueron los valores más elevados asociados a panes con corteza más dorada. Al aumentar el contenido de avena en la premezcla, el IP disminuyó un 22% y un 30% para las mezclas con un 15% y un 25%, respectivamente, sugiriendo que la corteza se volvió más clara, menos dorada. Estos resultados coinciden con los encontrados por Litwinek y col. (2021) quienes estudiaron panes con 50% harina de avena y 50% harina de trigo pan y encontraron una disminución en el color de la corteza respecto al pan 100% harina de trigo. En este contexto, Tamba-Berehoiu y colaboradores en 2019 encontraron que, cuando se mezclaba harina de trigo hasta un 50% con harina de avena el color de la corteza del pan era más claro a medida que la cantidad de avena aumentaba, ese fenómeno podría estar en relación a una disminución en la reacción de Maillard y a la formación de dextrinas, como consecuencia de la reducción de agua disponible para dicha reacción. Por otro lado, Lodono en 2015, encontró que los beta-glucanos aumentan la viscosidad, la cual probablemente disminuya la difusión de moléculas con grupos amino y carboxilo libres, con el consecuente decrecimiento de la reacción de Maillard.

### 5.2.3. Textura de las migas

Los parámetros obtenidos a partir del análisis de perfil de textura (TPA) de la miga son importantes al momento de analizar el efecto de la formulación sobre la calidad del pan, debido a que están relacionados con la percepción del consumidor. Los consumidores prefieren panes con miga tierna y aireada, asociado a bajos valores de firmeza. La integración de los componentes es un atributo importante, de manera que la cohesividad alta es deseada. Además, un pan fresco debe tener una miga con una elasticidad que no se oponga al proceso de masticación. La masticabilidad es un parámetro asociado al esfuerzo que hay que realizar durante la masticación y depende de la elasticidad, la firmeza y la cohesividad de la miga; se pretende que sea baja. La textura de la miga se encuentra relacionada directamente con otras características del producto como son la humedad, la densidad y la porosidad. En general, la firmeza de un producto panificado será menor a mayores valores de humedad y volumen de este. Además, el tamaño y la distribución de los alvéolos también influyen en la textura de la miga (Salinas, 2013).

En la Figura 5.3 se observan los parámetros Firmeza, Cohesividad, Masticabilidad y Elasticidad obtenidos a partir de TPA de migas frescas de los panes control (100% harina de trigo) y de las formulaciones con 5, 15 y 25% de harina de avena. Como puede observarse, la firmeza va aumentando significativamente a medida que el contenido de avena aumenta, mientras que la cohesividad y la elasticidad no mostraron diferencias estadísticas entre las formulaciones, indicando que la integridad de la miga no se ve alterada por la presencia de componentes de la avena. Por último, la masticabilidad varía en el mismo sentido que la firmeza, o sea las migas más blandas presentan menor masticabilidad, asociado a una menor fuerza de masticación. Además, como se mencionó anteriormente, los panificados que poseen migas más duras son los que presentaron volúmenes específicos inferiores y miga más compacta.



**Figura 5.3.** Parámetros de textura de miga para los panes control y con diferente contenido de harina de avena. Las letras indican diferencias significativas entre las formulaciones ( $p < 0,05$ ).

Resultados similares fueron encontrados por Litwinek y col. (2021), quienes estudiaron panes mezclas con 50% harina de avena y 50% harina de trigo pan; dichos autores encontraron características deficientes en la textura de la miga de los panes mezcla respecto al pan 100% harina de trigo pan y se lo atribuyeron a la disminución en el volumen específico del pan mezcla. Rieder y colaboradores en 2012 realizaron un trabajo similar agregando harina de avena en proporciones de entre 5 y 25% y encontraron un aumento significativo en la firmeza de la miga, atribuido a la caída en el volumen de pan. Djordjević y col., en 2022 estudiaron panes de avena y encontraron que la cohesividad y elasticidad disminuyeron con respecto a los panes de trigo. El no haber encontrado diferencias entre la cohesividad de las migas de las diferentes formulaciones indicaría que no ocurrieron problemas de desgrane durante la compresión.

#### 5.2.4. Propiedades de hidratación y acidez de las migas

Se entiende como actividad de agua (valor  $a_w$ ), la humedad en equilibrio de un producto, determinada por la presión parcial del vapor de agua en su superficie. El valor  $a_w$  depende de la composición, la temperatura y el contenido en agua del producto. Tiene incidencia sobre las características de calidad, tales como: textura, sabor, color, gusto, valor nutricional del producto y su tiempo de conservación (Bárceñas y col., 2004).

Los microorganismos necesitan la presencia de agua, en una forma disponible, para crecer y llevar a cabo sus funciones metabólicas. La mejor forma de medir la disponibilidad de agua es mediante la actividad de agua ( $a_w$ ). La  $a_w$  de un alimento se puede reducir aumentando la concentración de solutos en la fase acuosa mediante la adición de los mismos o mediante la extracción del agua por medio de algún método de secado: evaporación, secado, liofilización, entre otros.

La actividad acuosa es uno de los factores intrínsecos que posibilitan o dificultan el crecimiento microbiano en los alimentos. Por ello la medición de este parámetro es importante para controlar dicho crecimiento.

En la Tabla 5.4 pueden observarse dos variables que determinan las propiedades de hidratación de la miga: humedad y  $a_w$ . En el caso de la humedad, podemos observar que a medida que el contenido de harina de avena adicionado a la formulación aumenta, la humedad disminuye significativamente (hasta la mezcla 15%), esto está en estrecha relación a lo mencionado anteriormente para textura de miga, más específicamente para el parámetro firmeza, a mayor valor de firmeza, menor es el contenido de humedad de la miga. Resultados similares fueron encontrados por Litwinek y colaboradores en 2021, quienes estudiaron panes con 50% harina de avena y 50% harina de trigo. El parámetro  $a_w$  no mostró diferencias significativas entre las formulaciones y su valor fue elevado, con lo cual esto podría dar lugar al crecimiento microbiano. El parámetro pH (Tabla 5.4) indica el grado de acidez de la miga, como se puede observar, la formulación 25% resultó significativamente más ácida, pero, de todas maneras, todos los valores de pH fueron mayores a 6,1, con lo que podemos decir que no hay una modificación importante de este parámetro en la miga por el agregado de avena. Esta tendencia a la acidez, podría ser explicada de la siguiente manera: la fase acuosa de las masas de cereales contiene mono, di y oligosacáridos y pequeños niveles de sal, minerales solubles en agua y vitaminas solubles en agua; durante la fermentación de la masa, la levadura produce ácidos orgánicos como el ácido succínico, que reducen el pH de 6,0 en la masa recién mezclada a aproximadamente 5,0 en la masa fermentada (Janssen y col., 2018).

**Tabla 5.4.** Propiedades de hidratación de la miga: Humedad de miga (HUM-MIGA), Actividad acuosa (aw) y Acidez en los panes (pH): Control (100% Harina de trigo pan); Mezcla 5% (Harina de trigo pan + 5% Harina de avena); Mezcla 15% (Harina de trigo pan + 15% Harina de avena); Mezcla 25% (Harina de trigo pan + 25% Harina de avena).

MUESTRAS	HUM-MIGA(%)	aw	pH
<b>CONTROL</b>	35,49±0,11c	0,968±0,001 a	6,31±0,05 b
<b>MEZCLA 5%</b>	34,28±0,43b	0,969±0,028 a	6,23±0,03 b
<b>MEZCLA 15%</b>	32,28±0,33a	0,971±0,002 a	6,22±0,06 b
<b>MEZCLA 25%</b>	34,98±0,09c	0,967±0,002 a	6,11±0,07 a

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Una vez analizadas diferentes características que hacen a la calidad panadera, resulta de interés observar el comportamiento de estos panes frente al almacenamiento durante distintos periodos de tiempo. Este comportamiento se evaluará a través de los parámetros que definen la textura de la miga y de las propiedades de hidratación de los panes.

### 5.3. Estabilidad de los panes frente al almacenamiento

Se estudiaron los cambios en la calidad panadera luego del almacenamiento a 1 y 3 días. Se evaluaron los parámetros que describen la textura de la miga (Firmeza, Masticabilidad, Cohesividad y Elasticidad) y los que definen las propiedades de hidratación (humedad y aw) y de acidez de la miga (pH).

#### 5.3.1. Evaluación de la textura de la miga

La pérdida de frescura del pan durante el almacenamiento disminuye la aceptabilidad por parte de los consumidores. Esto se conoce como envejecimiento del pan e incluye los siguientes procesos: endurecimiento de la miga, pérdida de crocancia de la corteza y deterioro de las propiedades organolépticas (Salinas, 2013).

A continuación, en las Tablas 5.5; 5.6; 5.7 y 5.8, se detallan los resultados del análisis de la varianza realizado a los diferentes parámetros de textura de la miga durante los días cero, uno y tres de almacenamiento. Como puede observarse, el tipo de formulación no tuvo efecto significativo sobre ninguna de las variables medidas (Firmeza,  $p=0,1926$ ; Masticabilidad,  $p=0,0589$ ; Cohesividad,  $p=0,8224$  y Elasticidad,  $p=0,1275$ ) y la varianza entre los días, dentro de al menos un tipo de formulación fue distinta a cero ( $p<0,001$ ).

**Tabla 5.5.** Análisis de la varianza (SC tipo III) para el parámetro de textura firmeza de la miga.

<b>FIRMEZA MIGA</b>						
<b>Fuente de Variación</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>	<b>(Error)</b>
<b>Modelo</b>	3935,87	11	357,81	261,43	<0,0001	
<b>Formulación</b>	1687,10	3	562,37	2,00	0,1926	(Formulación>Día)
<b>Formulación&gt;Día</b>	2248,77	8	281,10	205,38	<0,0001	
<b>Error</b>	114,97	84	1,37			
<b>Total</b>	4050,84	95				

**Tabla 5.6.** Análisis de la varianza (SC tipo III) para el parámetro de textura masticabilidad de la miga.

<b>MASTICABILIDAD MIGA</b>						
<b>Fuente de Variación</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>	<b>(Error)</b>
<b>Modelo</b>	482,76	11	43,89	111,68	<0,0001	
<b>Formulación</b>	283,06	3	94,35	3,78	0,0589	(Formulación>Día)
<b>Formulación&gt;Día</b>	199,70	8	24,96	63,52	<0,0001	
<b>Error</b>	33,01	84	0,39			
<b>Total</b>	515,77	95				

**Tabla 5.7.** Análisis de la varianza (SC tipo III) para el parámetro de textura cohesividad de la miga.

<b>COHESIVIDAD MIGA</b>						
<b>Fuente de Variación</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>	<b>(Error)</b>
<b>Modelo</b>	0,59	11	0,05	34,25	<0,0001	
<b>Formulación</b>	0,06	3	0,02	0,3	0,8224	(Formulación>Día)
<b>Formulación&gt;Día</b>	0,53	8	0,07	42,28	<0,0001	
<b>Error</b>	0,13	84	0,00016			
<b>Total</b>	0,73	95				

**Tabla 5.8.** Análisis de la varianza (SC tipo III) para el parámetro de textura elasticidad de la miga.

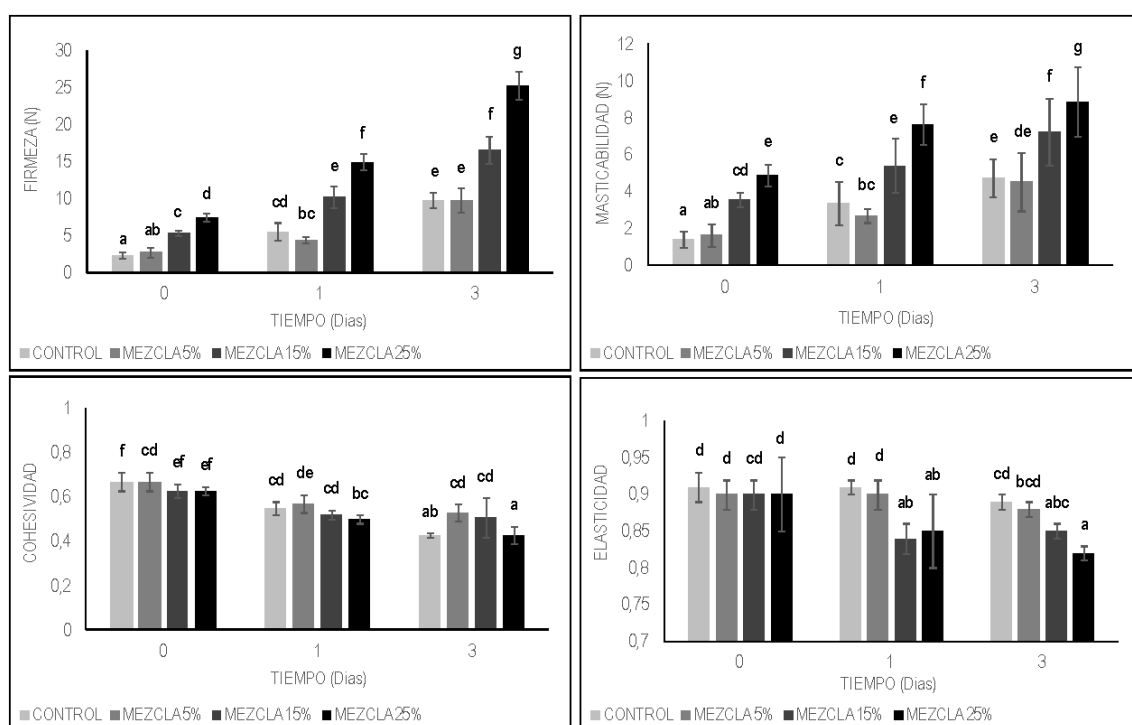
<b>ELASTICIDAD MIGA</b>						
<b>Fuente de Variación</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>	<b>(Error)</b>
<b>Modelo</b>	0,07	11	0,01	10,94	<0,0001	
<b>Formulación</b>	0,04	3	0,01	2,57	0,1275	(Formulación>Día)
<b>Formulación&gt;Día</b>	0,04	8	0,0005	7,67	<0,0001	
<b>Error</b>	0,05	84	0,00006			
<b>Total</b>	0,13	95				

En la Figura 5.4 se observan los parámetros de textura medidos en el pan fresco (día cero) y en los almacenados (día 1 y 3). Como era de esperarse, la dureza de las migas aumentó



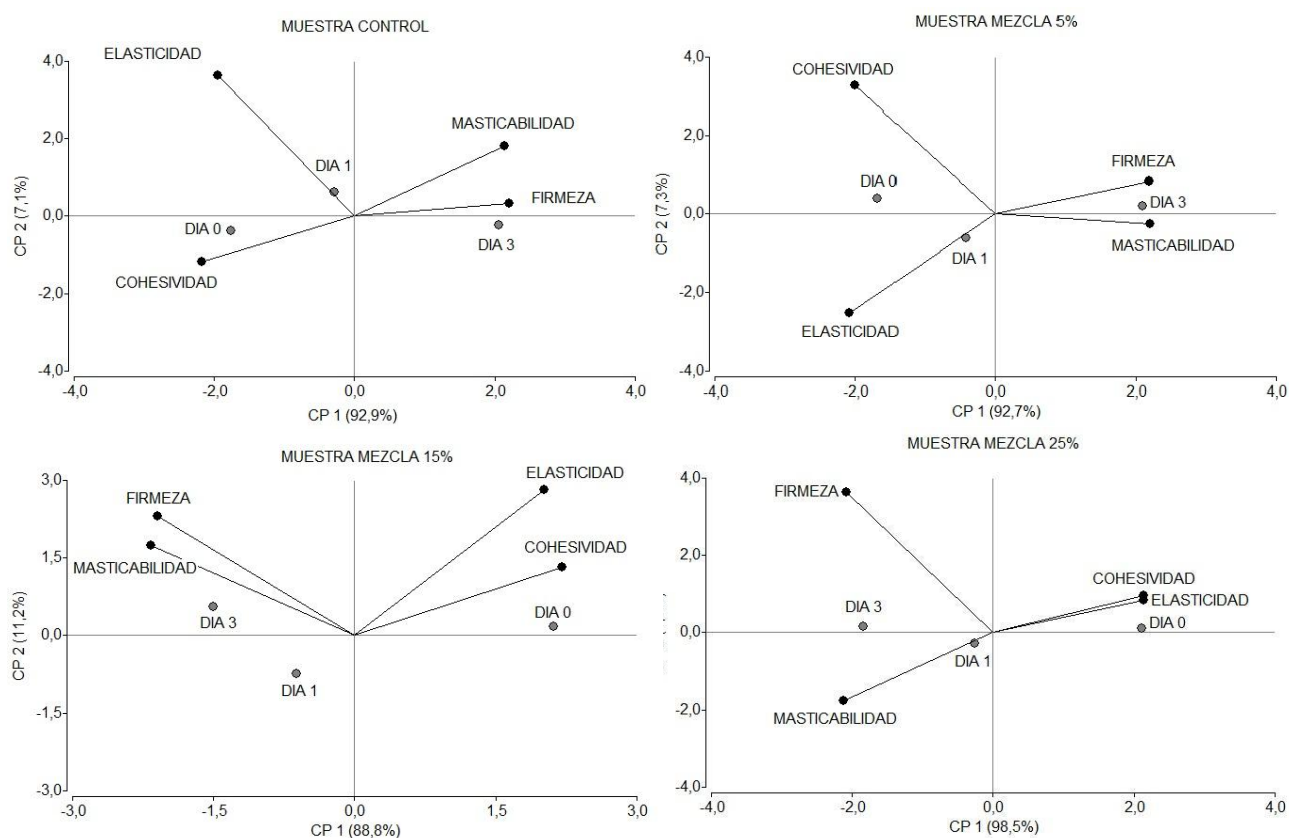
significativamente con los días de almacenamiento. El mismo comportamiento lo mostró la resistencia a la masticación, medida a través de la variable masticabilidad. Estas variaciones observadas están asociadas a la pérdida significativa de humedad que se observó para en la miga a lo largo de los días de almacenamiento (Tabla 5.6).

Con los días de almacenamiento, las migas se tornaron menos cohesivas, es decir que se desgranaron cada vez más durante la compresión a medida que los días de almacenamiento transcurrían. La elasticidad siguió el mismo patrón que la cohesividad, mostrando una caída con el tiempo de almacenamiento.



**Figura 5.4.** Parámetros de textura de miga durante los días de almacenamiento (Día 0, 1 y 3) para los panes control y con diferente contenido de harina de avena: mezcla 5%, mezcla 15% y mezcla 25%. Las letras indican diferencias significativas entre las formulaciones y los días de almacenamiento ( $p < 0,05$ ).

En la Figura 5.5 se representan los gráficos biplot para cada tipo de pan. En los mismos, los vectores representan los atributos que definen la textura de la miga, y los puntos representan los días de almacenamiento (0, 1 y 3). A nivel general se observa que la masticabilidad y la firmeza están asociados de manera positiva en todos los panes y que se ven aumentados en el día 3 de almacenamiento. La cohesividad, contrariamente, está más asociada con los panes del día cero, independientemente de la formulación que se trate.



**Figura 5.5.** Biplot resultante del Análisis de Componentes Principales de los parámetros de textura de miga durante los días de almacenamiento (Día 0, 1 y 3) para los panes control y con diferente contenido de harina de avena: mezcla 5%, mezcla 15% y mezcla 25%.

### 5.3.2. Evaluación de las propiedades de hidratación y acidez de las migas durante el almacenamiento

En las Tablas 5.9; 5.10 y 5.11 se detallan los resultados del análisis de la varianza realizados a los diferentes parámetros de hidratación (humedad y aw) y acidez de la miga durante los días cero, uno y tres de almacenamiento.

**Tabla 5.9.** Análisis de la varianza (SC tipo III) para el parámetro humedad de la miga.

HUMEDAD DE MIGA						
Fuente de Variación	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
<b>Modelo</b>	203,70	11	18,52	23,91	<0,0001	
<b>Muestra</b>	63,80	3	21,27	27,46	<0,0001	(Muestra>Día)
<b>Muestra&gt;Día</b>	139,89	8	17,49	22,58	<0,0001	
<b>Error</b>	18,59	24	0,77			
<b>Total</b>	222,28	35				

**Tabla 5.10.** Análisis de la varianza (SC tipo III) para el parámetro actividad acuosa de la miga.

<b>ACTIVIDAD ACUOSA MIGA</b>						
<b>Fuente de Variación</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>	<b>(Error)</b>
<b>Modelo</b>	0,0005	11	0,00004	3,38	0,0061	
<b>Muestra</b>	0,0003	3	0,0001	8,97	<0,0001	(Muestra>Día)
<b>Muestra&gt;Día</b>	0,0001	8	0,00002	1,28	0,2979	
<b>Error</b>	0,0003	24	0,00001			
<b>Total</b>	0,0008	35				

**Tabla 5.11.** Análisis de la varianza (SC tipo III) para el parámetro pH de la miga.

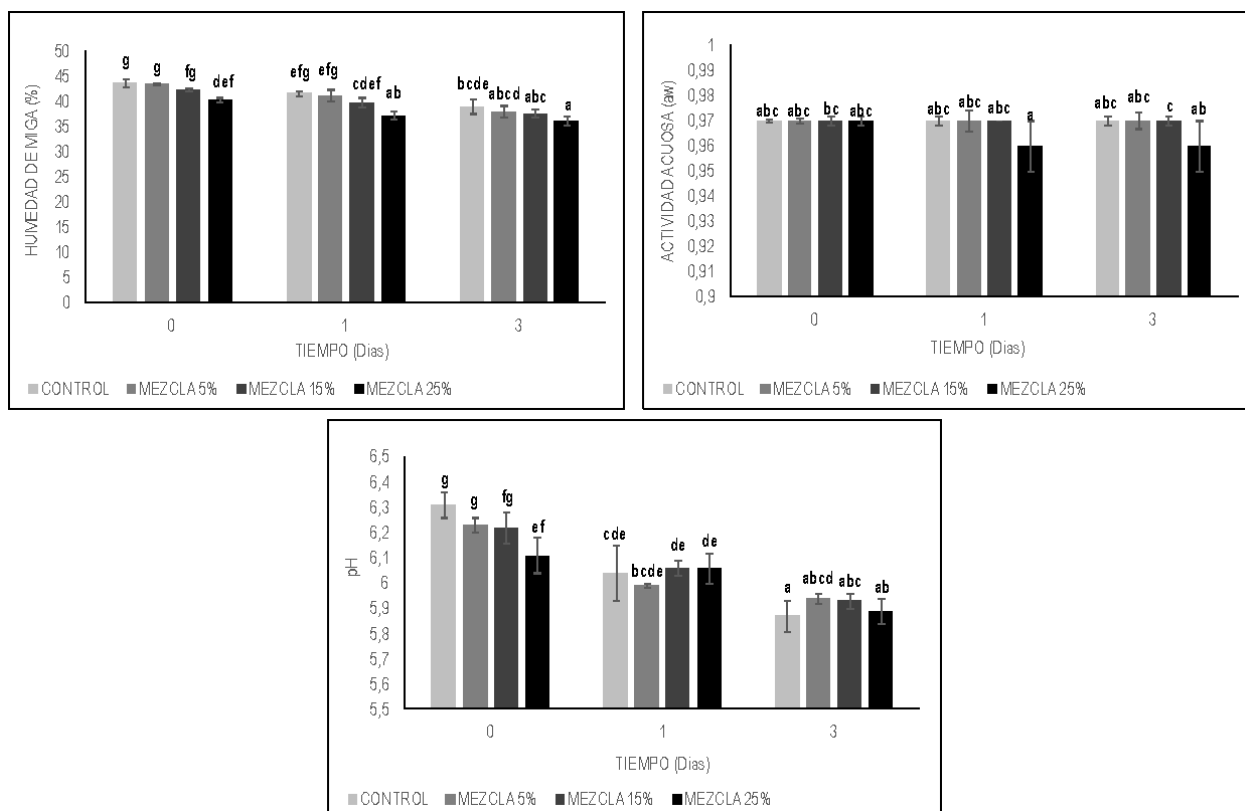
<b>pH MIGA</b>						
<b>Fuente de Variación</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>	<b>(Error)</b>
<b>Modelo</b>	1,11	11	0,10	33,37	<0,0001	
<b>Muestra</b>	0,03	3	0,01	3,06	0,0371	(Muestra>Día)
<b>Muestra&gt;Día</b>	1,08	8	0,14	44,73	<0,0001	
<b>Error</b>	0,15	24	0,003			
<b>Total</b>	1,26	35				

Para la variable humedad de la miga, el tipo de panificado tuvo efecto altamente significativo ( $p < 0,001$ ) y la varianza entre los días, dentro de al menos un tipo de pan fue distinta a cero ( $p < 0,001$ ).

En la actividad acuosa, el tipo de panificado tuvo efecto altamente significativo ( $p < 0,001$ ) pero la varianza entre los días, dentro de al menos un tipo de pan fue no significativa ( $p = 0,2979$ ).

Finalmente, el pH mostró que el tipo de panificado no tuvo efecto altamente significativo ( $p = 0,0371$ ) y que la varianza entre los días, dentro de al menos un tipo de pan fue distinta a cero ( $p < 0,001$ ).

La Figura 5.6 muestra las variaciones en las propiedades de hidratación (humedad y actividad acuosa) y los cambios en la acidez de la miga con los días de almacenamiento.



**Figura 5.6.** Parámetros de hidratación (Humedad de miga y Actividad acuosa) y acidez (pH) de la miga durante los días de almacenamiento (Día 0, 1 y 3) para los panes control y con diferente contenido de harina de avena: mezcla 5%, mezcla 15% y mezcla 25%. Las letras indican diferencias significativas entre las formulaciones y los días de almacenamiento ( $p < 0,05$ ).

Para el parámetro humedad de miga observamos una disminución significativa con los días de almacenamiento, esto explica los cambios observados anteriormente en textura de miga, más específicamente en la firmeza.

En el caso de la actividad acuosa, también se observa una disminución a medida que transcurren los días desde la elaboración, no es una disminución muy importante, pero se puede inferir que las formulaciones con mayor contenido de harina de avena tienen los valores más bajos en el día 3 de almacenamiento.

En el caso de la acidez de la miga, medida a través del pH, se observan mayores valores de acidez con los días de almacenamiento. De todas maneras, los valores son cercanos a pH 6 (neutralidad implica pH 7 y las migas todavía siguen siendo ácidas) por lo que no estaría indicando deterioro del alimento.

En resumen, el análisis de textura de la miga en los distintos días de almacenamiento mostró que es independiente del tipo de formulación analizada y que, en todos los casos la dureza tiende al aumento, mientras que la cohesividad tiende a disminuir, resultando en migas que se desgranar

más fácilmente. En cuanto a las propiedades de hidratación, sí se encontraron diferencias según el tipo de formulación estudiada. A continuación, es deseable centrarse en estudiar si existen mejoras en la composición nutricional de los panes por el agregado de harina de avena a las formulaciones.

#### 5.4. Composición nutricional de los panes

Los valores de la composición porcentual se muestran en la Tabla 5.12. Se puede observar que la humedad resultó entre 32,3 y 35,5%. El contenido de proteínas fue significativamente similar ( $\approx 9,4\%$ ) hasta un 15% de avena añadida; mientras que con un 25% de avena se observó una disminución del 0,56% en el porcentaje de proteína respecto al pan control-C. Los panes con los niveles más altos de avena (15 y 25%) presentaron un mayor porcentaje de lípidos, esto va en línea con los resultados obtenidos en la composición de las harinas (Tabla 3.9) donde se evidenció que el contenido lipídico de la avena es superior al del trigo pan y coincide con datos de bibliografía (Litwinek y col., 2021). Los niveles de cenizas fueron significativamente similares en todas las formulaciones estudiadas. Los valores de fibra dietaria total mostraron un aumento progresivo significativo a medida que aumentó el porcentaje de harina de avena en la formulación. Este comportamiento está en consonancia con la composición de las harinas puras (Tabla 3.9), siendo evidente que los contenidos en lípidos y FDT de la harina de avena fueron mayores que los del trigo y coincide con los datos de la literatura (Litwinek y col., 2021).

En el caso del contenido de los  $\beta$ -glucanos, también se observó un aumento progresivo con la adición de harina de avena, alcanzando en el nivel máximo (25%) un incremento de 3,5 veces el valor del pan de trigo. Litwinek y col. (2021) consiguieron aumentos de entre el 0,80 y el 0,85% en panes con un 50% de harina de avena. Nuestro aumento, en forma relativa fue mayor debido a que se utilizó una variedad de INTA de alto contenido de  $\beta$ -glucanos (INTA Calen). En varios trabajos se comprobó que la adición de harina de avena en productos de panadería, incluso en pequeñas cantidades, produce modificaciones en la composición química del producto final (Gibiński y col., 2010; Gambuś y col., 2011). Por otro lado, Litwinek y col. (2021) encontraron que la adición de avena provocaba un aumento en el contenido de lípidos, cenizas, fibra y  $\beta$ -glucanos; en comparación con un pan elaborado con 100% de harina de trigo. Manthey y colaboradores en 1999, encontraron que en la avena, la fibra soluble ocupaba hasta un 42% de la fibra dietaria total. Esta fibra soluble contenía mayoritariamente beta-glucanos (64%), azúcares neutros (15% arabinosa, 10% galactosa, 1,5% manosa, 1,5% ribosa y 7% xilosa), y ácido urónico (0,1%). Por otro lado, el 58% de la fibra dietaria correspondía a fibra insoluble, compuesta de azúcares neutros

(20% arabinosa, 2,5% galactosa, 40% glucosa, 2,7% manosa, 2,3% ribosa y 30% de xilosa), 0,5% de ácido urónico y aproximadamente un 2,7% de lignina. Los panes con avena, de acuerdo a la legislación argentina, son considerados como de alto contenido de fibra, considerando que 100 g de pan contine más de 6 g de fibra dietaria.

**Tabla 5.12.** Composición y análisis nutricional de los panes control y con diferente contenido de harina de avena: mezcla 5%, mezcla 15% y mezcla 25%. Contenido de: Humedad (HUM, %); proteína (PROT, %);  $\beta$ -glucanos (%); Lípidos (%); Cenizas (%) y Fibra Dietaria Total (FDT, %).

MUESTRAS	HUM (%)	PROT (%)	$\beta$ -GLUCANOS (%)	LÍPIDOS (%)	CENIZAS (%)	FDT (%)
<b>CONTROL</b>	35,49±0,11c	9,52±0,08b	0,210±0,042a	0,27±0,02a	1,51±0,02a	3,85±0,04a
<b>MEZCLA 5%</b>	34,28±0,43b	9,36±0,09b	0,319±0,034b	0,38±0,02a	1,35±0,01a	5,69±0,10b
<b>MEZCLA 15%</b>	32,28±0,33a	9,29±0,08b	0,560±0,033c	0,70±0,01b	1,47±0,13a	6,00±0,06c
<b>MEZCLA 25%</b>	34,92±0,09c	8,96±0,05a	0,739±0,003d	0,68±0,02b	1,29±0,01a	6,63±0,46d

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

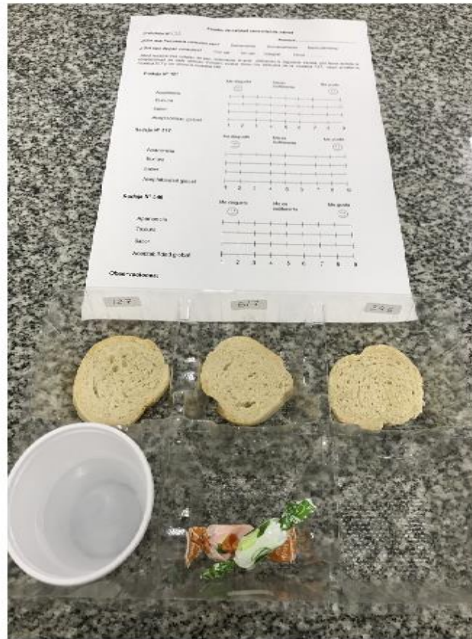
En este sentido, el agregado de harina de avena en los panificados de trigo pan aumentó significativamente el contenido de los componentes de mayor interés en este estudio que son:  $\beta$ -glucanos y fibra dietaria total.

Ahora resulta importante analizar cómo será el grado de aceptación de estos panes por parte del consumidor ya que de nada sirve elaborar panes con mejoras nutricionales si el consumidor no los elegiría.

### 5.5. Calidad sensorial de panes

Para realizar la evaluación sensorial de los panes, se utilizaron distintos atributos y, como muestra la Figura 5.7 se utilizó una planilla y a cada consumidor se le dio una rodaja de cada formulación de pan con harina de avena (5, 15 y 25%).

## ANÁLISIS SENSORIAL

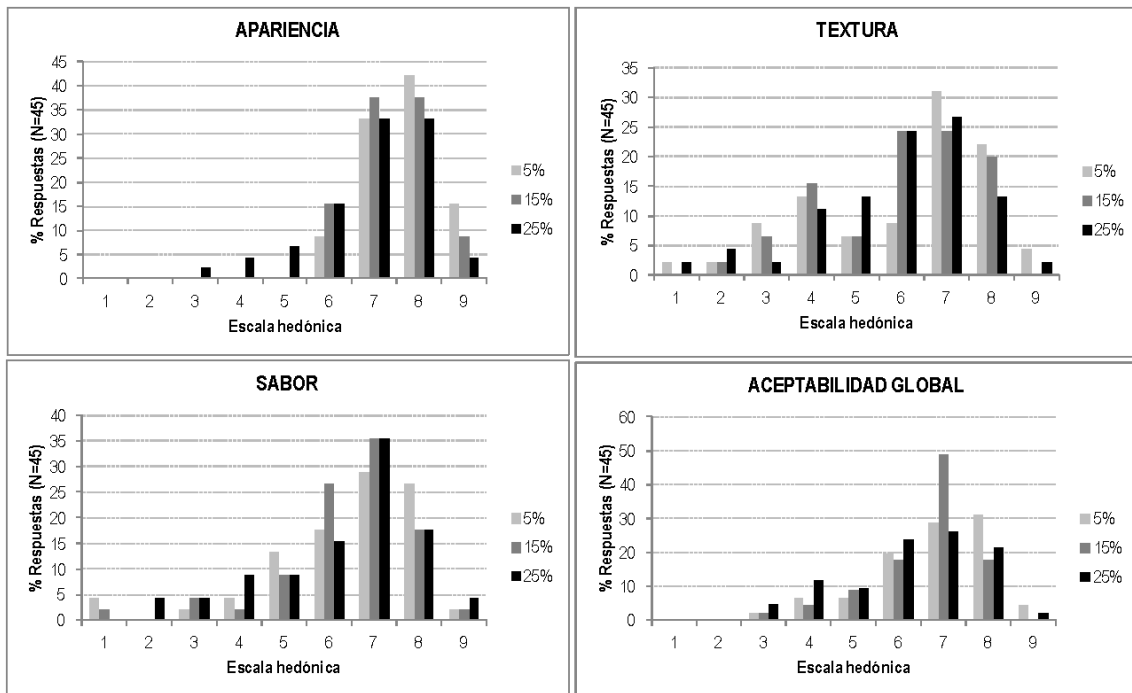


**Figura 5.7.** Presentación para cada consumidor de la planilla y las rodajas de pan a evaluar.

En los gráficos de la Figura 5.8 se muestran los porcentajes de respuesta para cada atributo analizado (Apariencia, Textura, Sabor y Aceptabilidad global) de las 3 formulaciones ensayadas. Para analizar cada atributo, se utilizó una escala hedónica de 9 puntos.

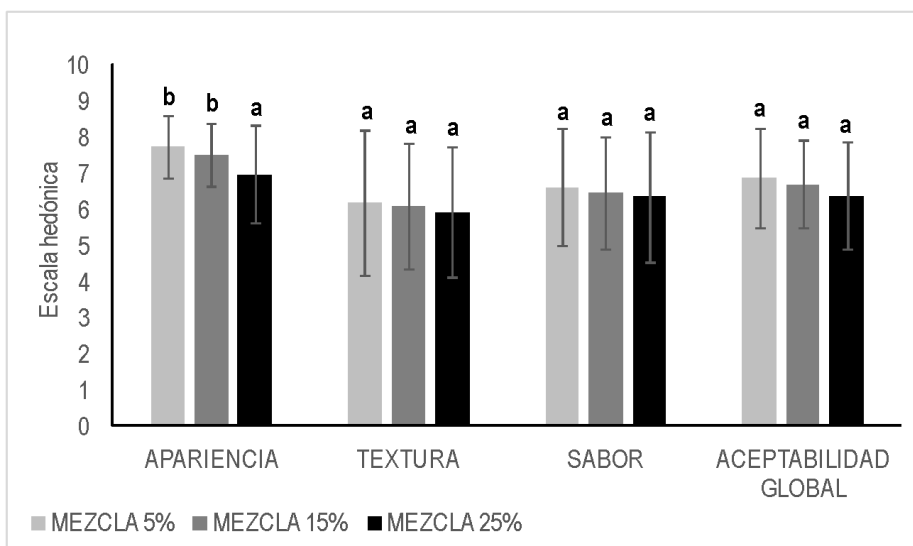
Para las tres formulaciones y los cuatro atributos evaluados, el mayor porcentaje de respuestas se encontró entre el punto 7 y 8 de la escala hedónica. En el caso de la apariencia fue de 75% para el pan con adición de 5% de harina de avena, 76% de respuestas para el pan 15% avena y 66% para la formulación con 25%. Para la textura el pan 5% contó con un 53% de respuestas entre 7 y 8 de la escala, el pan 15% tuvo 44% y la formulación con 25% de avena obtuvo un 40%. El sabor mostró un 56% de respuestas entre los valores mencionados para la formulación 5% y un 53% tanto para la mezcla con 15% como con 25% de adición de harina de avena.

La aceptabilidad global recibió también los mayores porcentajes de respuesta entre los puntos 7 y 8 de la escala y fueron, en todas las formulaciones, mayores al 50%.



**Figura 5.8.** Porcentaje de respuesta de los panes con avena: mezcla 5%, mezcla 15% y mezcla 25% para los atributos: Apariencia, Textura, Sabor y Aceptabilidad global.

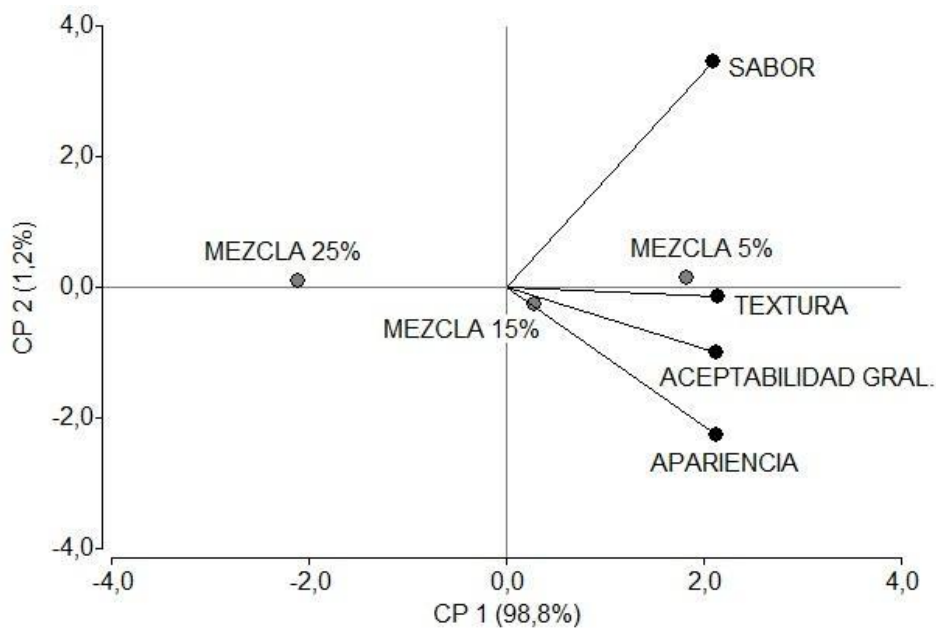
Si observamos la Figura 5.9 podemos ver los resultados estadísticos de la comparación entre panes dentro de cada atributo de calidad sensorial medido. En este caso, sólo para el atributo apariencia se encontraron diferencias significativas entre el pan 25% y las otras dos formulaciones. Siendo el que contenía 25% de harina de avena el de peor apariencia.



**Figura 5.9.** Resultados del análisis de la varianza entre los tipos de panes con avena: mezcla 5%, mezcla 15% y mezcla 25% para los atributos: Apariencia, Textura, Sabor y Aceptabilidad global. Las letras indican diferencias significativas entre las formulaciones para cada atributo sensorial ( $p < 0,05$ ).



La Figura 5.10 muestra en un gráfico de componentes principales, el grado de asociación entre los atributos medidos y las formulaciones empleadas. Por un lado, se evidencia que la formulación 25% presenta una asociación negativa con los atributos que determinan la calidad de los panificados, la mezcla 15% se ubica en el centro del biplot y, por lo tanto, resultaría de una calidad sensorial intermedia, por último, la formulación con 5% de harina de avena sería la que recibiría una aceptación positiva debido a la cercanía de la misma con los vectores que representan todos los atributos medidos.



**Figura 5.10.** Biplot resultante del Análisis de Componentes Principales de los parámetros de calidad sensorial para los panes control y con diferente contenido de harina de avena: mezcla 5%, mezcla 15% y mezcla 25%.

Luego de haber completado el análisis de las formulaciones de panificados con harina de trigo pan y avena, se decidió elaborar y evaluar panificados libres de harina de trigo pan (libres de gluten), como una alternativa para potenciar el uso de la harina de avena en alimentos para celíacos.

## PANES LIBRES DE TRIGO PAN

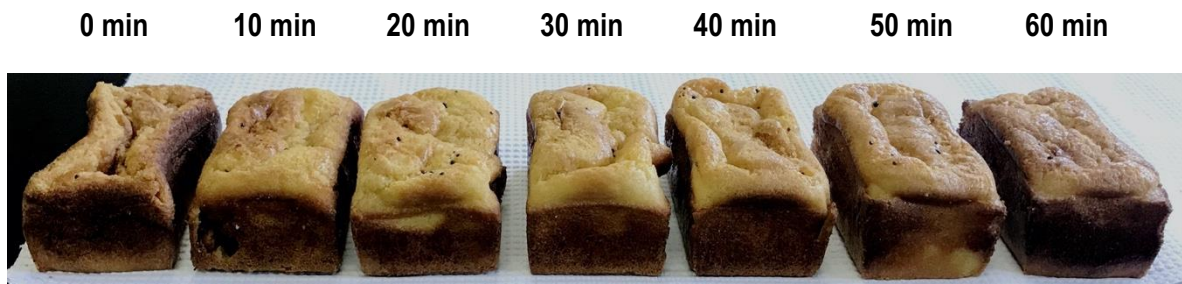
### 5.6. Elaboración de panificados libres de trigo pan y optimización del tiempo de fermentación

La obtención de las formulaciones y la elaboración de los panificados fue descrita en el Capítulo 2 (Materiales y Métodos). A continuación, se describe el pan obtenido con la formulación del punto central del diseño de mezclas (partes iguales de maíz, arroz y avena) a diferentes tiempos con el objetivo de determinar el tiempo óptimo de fermentación. Luego, con todos los puntos del diseño de mezclas, se realizó una caracterización fisicoquímica de los panes para lograr una formulación óptima, maximizando los resultados de calidad panadera. Finalmente, sobre el panificado óptimo, se analizó el perfil nutricional.

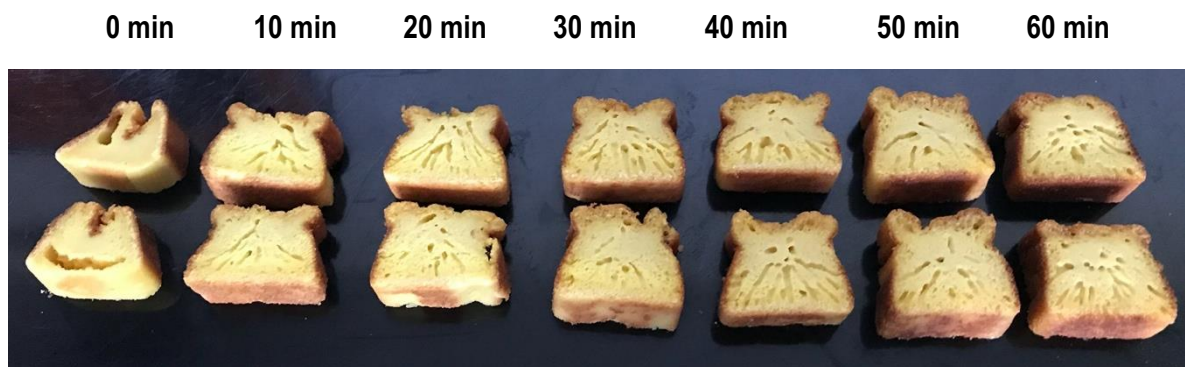
La Figura 5.11 muestra el pan del punto central (por triplicado) una vez definido el tiempo óptimo de fermentación. Para llegar a definirlo, trabajando con el punto central, las masas se fermentaron a 30°C y 85% de humedad entre 0 a 60 minutos antes de hornear. Se realizó una inspección visual de los panes y se pudo inferir que el tiempo óptimo de fermentación estaría entre los 50 y los 60 minutos debido a que en ambos se observan las mejores características externas, obteniéndose panes de forma más homogénea y migas con alveolado uniforme en toda la rodaja de pan (Figuras 5.12 y 5.13).



**Figura 5.11.** Panes del punto central.

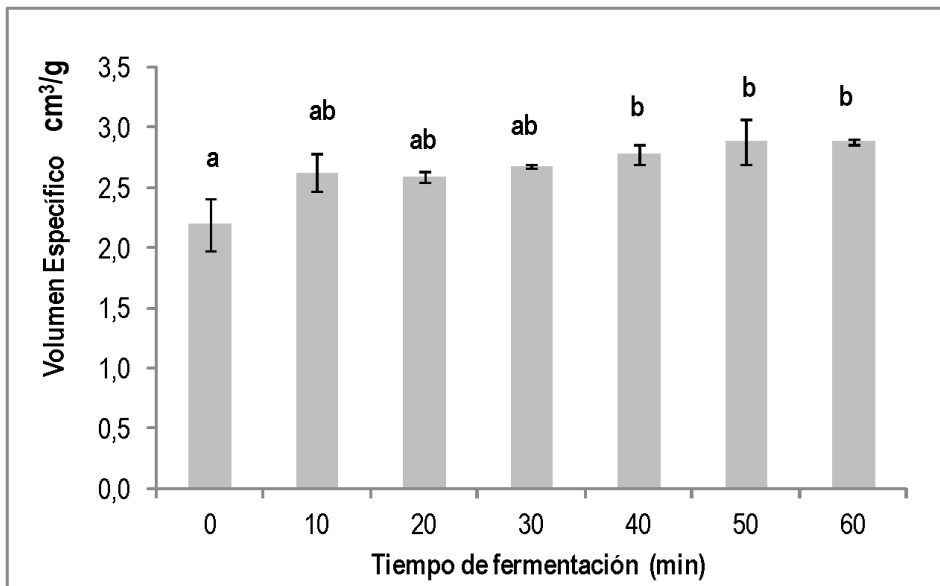


**Figura 5.12.** Panes con distinto tiempo de fermentación.



**Figura 5.13.** Rodajas y migas de los panes de punto central a distinto tiempo de fermentación.

El volumen específico de los panes obtenidos a partir de la formulación 10 (punto central) sometidos a distintos tiempos de fermentación se muestra en la Figura 5.14. Como puede observarse, sólo se encontraron diferencias significativas entre el pan sin fermentar y los sometidos a tiempos de fermentación mayores a 40 min. En base a estos resultados y las características visuales detalladas anteriormente se decidió utilizar como tiempo de fermentación 50 min para todos los niveles del diseño de mezcla.



**Figura 5.14.** Volumen específico de los panes del punto central sometidos a distintos tiempos de fermentación. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tiempos de fermentación ensayados ( $p < 0,05$ ).

### 5.7. Evaluación de las características fisicoquímicas de los panes del diseño de mezclas

La Tabla 5.13 muestra los datos arrojados por el programa DesingExpert 7.0.0, donde se informan las diferentes proporciones de cada harina para cada punto del diseño, manteniendo constante el resto de los ingredientes (polvo de hornear, sal, levadura, leche, huevos y aceite vegetal). Los diferentes contenidos de las harinas se expresan en forma porcentual dentro de la formulación, el contenido total de harina o mezcla de harinas siempre fue del 25% p/p, sumando los otros componentes el 75% restante.

**Tabla 5.13.** Diseño de mezclas de harinas utilizadas en la formulación de los panificados de acuerdo al planeamiento experimental triangular. Porcentaje de participación de las harinas en cada punto.

FORMULACION	HARINA AVENA (%)	HARINA ARROZ (%)	HARINA MAIZ (%)
1	-	-	100
2	-	100	-
3	100	-	-
4	-	50	50
5	50	-	50
6	50	50	-
7	16,66	16,66	66,66
8	16,66	66,66	16,66
9	66,66	16,66	16,66
10	33,33	33,33	33,33

En la Figura 5.15 se muestran las fotos de los panes correspondientes a las 10 formulaciones del diseño de mezclas.

La Figura 5.15-A muestra la formulación 1 (100% Harina de maíz), la formulación 2 (100% Harina de arroz) y la formulación 3 (100% Harina de avena). Podemos observar, tanto el aspecto exterior como el interior de cada una. Podríamos inferir que el pan elaborado en su totalidad con harina de avena mostraría un aspecto superior, tanto en su parte externa como interna (miga). Las otras dos formulaciones muestran panes más chicos y con migas apelmazadas, esto es más marcado aún en la formulación realizada con 100% harina de arroz. También el color muestra claras diferencias, los puntos 1 y 2 tienden a ser más amarillos, atribuido posiblemente a los carotenoides de las harinas, especialmente en maíz, o a las interacciones entre las proteínas de yema de huevo con algunos de los componentes de estas harinas, resaltando el color amarillo.

Entre todos los cereales, y aun siendo el nivel de carotenoides en estos alimentos relativamente bajo en comparación con frutas o verduras, podemos citar al maíz (*Zea mays* L.) de genotipo amarillo como el que presenta mayores niveles de estos compuestos. La mayoría de los cultivares presentan zeaxantina como pigmento mayoritario y muestran también cantidades considerables de  $\beta$ -criptoxantina, y de  $\alpha$ - y  $\beta$ -caroteno en menor medida (Panfili y col., 2004). En el caso del grano de arroz (*Oryza sativa* L.) convencional, el contenido en carotenoides se concentra casi en

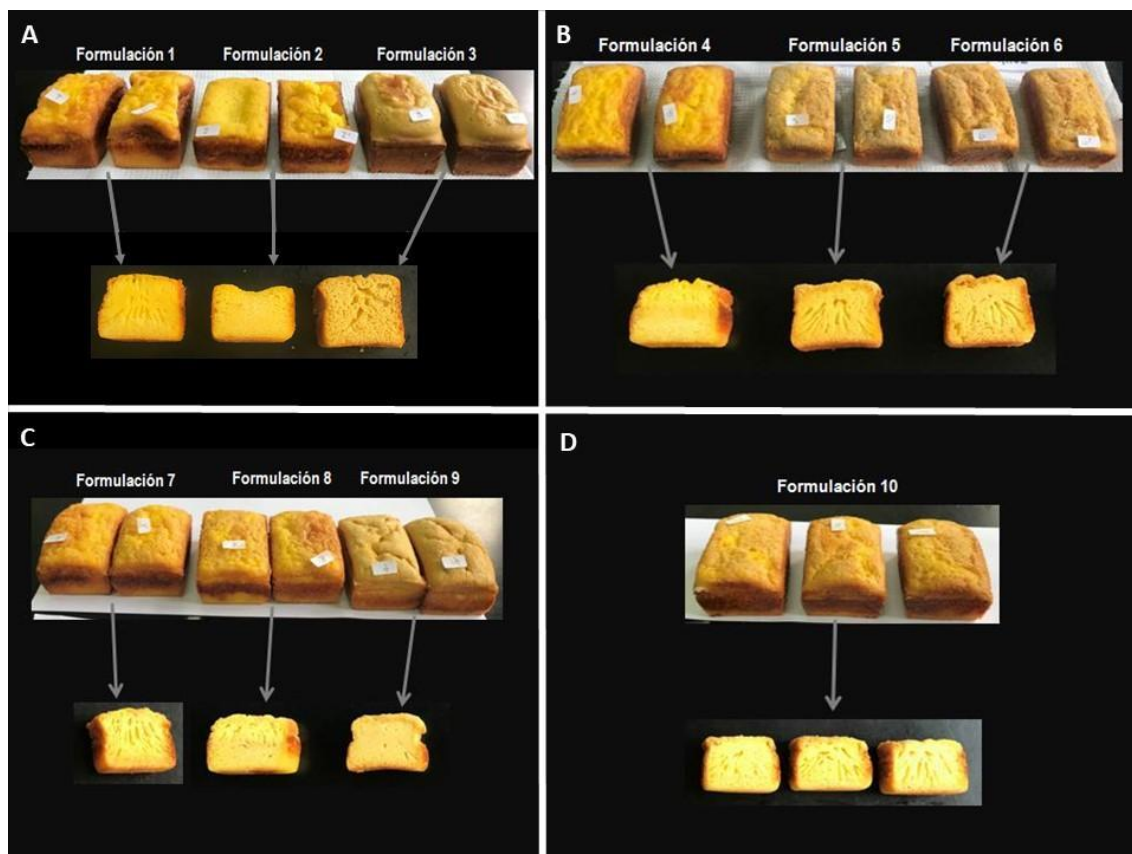
exclusividad en el salvado (Fardet y col., 2008; Sellappan y col., 2009), por lo que las habituales prácticas de molienda y pulido del grano conllevan una reducción drástica de estos componentes en el producto que llega al consumidor (Tan y col., 2005). Al igual que para casi todos los cereales, la luteína resulta ser el pigmento mayoritario (Belefant-Miller y Grace, 2010).

Por otro lado, el punto 3 presenta a simple vista un color de corteza más oscuro y una miga menos amarilla, propio de la harina integral de avena utilizada. Esta harina aporta a la mezcla fibra dietaria y azúcares reductores, promoviendo la reacción de Maillard en la corteza y la caramelización durante el horneado contribuyendo a un color más oscuro (Djordjevic y col., 2022).

En la Figura 5.15-B se observan las formulaciones de los puntos: 4 (50% Harina de arroz/ 50% Harina de maíz); 5 (50% Harina de avena/ 50% Harina de maíz) y 6 (50% Harina de avena/ 50% Harina de arroz). Las formulaciones 5 y 6 presentaron mayor tamaño de rodaja y un color de corteza más oscuro, debido al mayor contenido de avena en ambas formulaciones. No se observaron diferencias notables a simple vista entre los panes 5 y 6. La formulación 4, especialmente en su aspecto interno parecería dar un pan más apelmazado.

En la Figura 5.15-C se muestran las formulaciones 7, 8 y 9. En este caso todas tienen al menos un cierto porcentaje de cada tipo de harina, pero más de la mitad es solo de un tipo. Así tenemos la formulación 7: 16,66% Harina de Avena- 16,66% Harina de arroz y 66,66% de Harina de maíz; la formulación 8: 16,66% Harina de Avena- 66,66% Harina de arroz y 16,66% de Harina de maíz y la formulación 9: 66,66% Harina de Avena- 16,66% Harina de arroz y 16,66% de Harina de maíz. Como se puede observar en las imágenes anteriores el punto con mayor contenido de harina de maíz es el que mostró mejor aspecto externo e interno, sin embargo las 3 formulaciones resultan semejantes.

Por último, para el punto central del diseño de mezclas (Figura 5.15-D), con iguales proporciones de cada una de las 3 harinas (33,33% de cada una) se observa un buen desarrollo de la pieza de pan, de la corteza y con una miga aireada con alvéolos uniformemente distribuidos en toda la miga y con buen aspecto.



**Figura 5.15.** Panificados correspondientes a las formulaciones del diseño de mezclas (Tabla 5.14). A-Panes con 100% de alguna de las harinas: 1, 2 y 3; B-Panes con 50% de alguna de las harinas: 4, 5 y 6; C-Panes con 66,6% de alguna de las harinas: 7, 8 y 9, D-Panes con 33,3% de cada harina (Formulación 10).

Una vez realizada la caracterización visual de los panificados de las diez formulaciones del diseño de mezclas se evaluaron las características fisicoquímicas de los mismos.

#### Evaluación del volumen específico, color y humedad de los panificados del diseño de mezclas

La Tabla 5.15 muestra los valores de volumen específico, índice de pardeamiento (IP) y humedad de miga de los panes obtenidos en los 10 puntos del diseño de mezclas. Como era de esperar, y como fuimos observando en el aspecto visual de los panes, el pan elaborado con 100% harina de avena (formulación 3) obtuvo un volumen específico significativamente mayor al resto de las formulaciones ( $3,31 \pm 0,02$ ), y estadísticamente similar a todas aquellas mezclas con harina de avena dentro de sus constituyentes; formulaciones 5=  $3,02 \pm 0,01$ ; 6=  $3,03 \pm 0,01$  y 9=  $3,08 \pm 0,14$ . Con respecto al color de la miga, todas fueron amarillentas, relacionadas posiblemente a los carotenos presentes en la yema de huevo. Como el huevo fue constante en todas las formulaciones, se calculó el índice de pardeamiento (IP), para evidenciar posibles diferencias entre

las harinas de maíz, arroz y avena. En la Tabla 5.14 se puede observar que los valores más elevados de IP se obtuvieron en las formulaciones con 100% de harina de maíz ( $130,5\pm 0,5$ ) y 100% de harina de avena ( $106,2\pm 0,4$ ). Djordjevic y col. (2022) informaron que el valor de  $L^*$  de la miga era menor (o sea migas más oscuras) en panificados elaborados con harina de arroz y de maíz, respecto a los elaborados con trigo pan. Si bien la harina de avena es blanca, la presencia de fibra soluble, principalmente  $\beta$ -glucanos, con extremos reductores en su cadena contribuyen con el desarrollo de color pardo a través de la reacción de Maillard en la corteza. Además, el maíz posee zeaxantina y luteína, compuestos que contribuyen al color de la miga (Panfili y col., 2004). Las migas más húmedas fueron las elaboradas con partes iguales de las tres harinas (formulación 10: 63,25%) y las migas de panes elaborados con partes iguales de maíz y arroz (formulación 4: 65,67%), seguida por la miga del pan elaborado con harina de maíz (formulación 1: 58,33%). La miga menos húmeda fue la elaborada con arroz (formulación 2: 47,92%), el arroz tiene alta capacidad de ligar agua y por ende deja menor cantidad de agua libre disponible. Debido a que todos los panes se elaboraron a partir de la misma cantidad de agua, pareciera que los componentes del maíz en la miga ligan menos agua, y ésta estaría más libre por lo que se eliminaría durante el secado más fácilmente. Sin embargo, todos los valores resultaron dentro de los estándares de humedad de miga de pan.

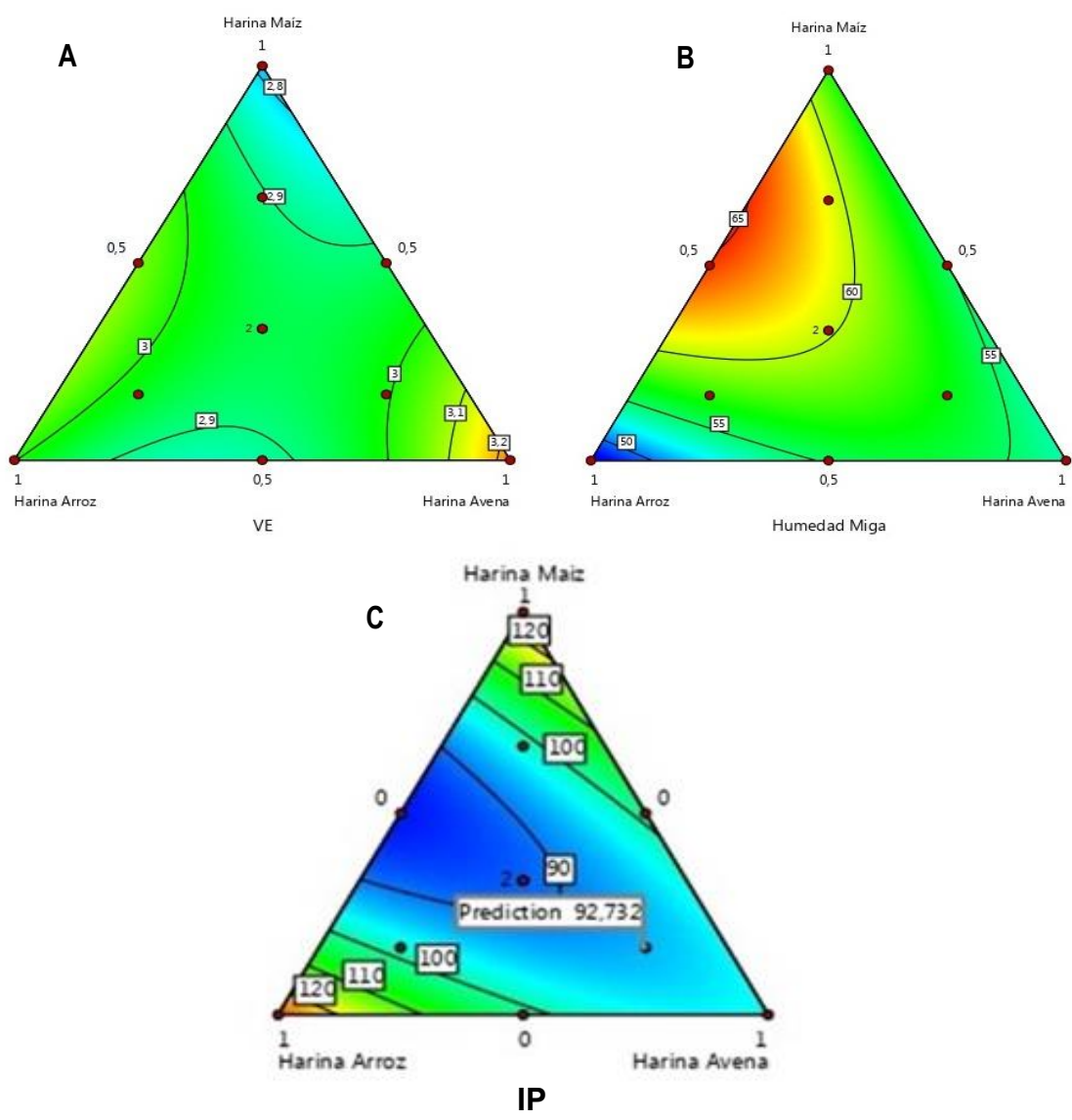


**Tabla 5.14.** Volumen Específico (VE), Índice de pardeamiento (IP) y Humedad de la miga, obtenidos para las distintas formulaciones del diseño de mezclas.

FORMULACIÓN	VE (cm <sup>3</sup> /g)	IP	HUMEDAD MIGA (%)
1	2,73±0,02 ab	130,5±0,58 g	58,33±0,04 d
2	3,00±0,16 bc	94,4±0,6 cd	47,92±0,62 a
3	3,31±0,02 d	106,2±0,4 f	53,81±0,16 b
4	2,66±0,07 a	85,1±0,9 b	65,67±0,21 e
5	3,02±0,01 bcd	95,2±0,1 d	55,26±0,21 bc
6	3,03±0,01 bcd	86,2±0,2 b	55,29±0,37 bc
7	2,97±0,06 abc	103,1±0,9 e	56,9±1,24 cd
8	2,88±0,07 abc	92,5±0,3 c	53,47±0,54 b
9	3,08±0,14 cd	82,2±0,6 a	55,32±0,16 bc
10	2,96±0,08 abc	93,2±0,3 cd	63,25±1,06 e

Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

Se realizó el análisis de superficie de respuesta de los tres parámetros estudiados en los panes sin trigo para poder definir una formulación óptima. En la Figura 5.16, se observan los gráficos de la superficie de contorno de volumen específico (VE) (A), humedad de miga (B) e IP de la miga (C). Un corrimiento del azul, pasando por el verde y amarillo, al rojo en la superficie de contorno implica mayores valores del parámetro evaluado. Se evidenció que la participación de la harina de avena en la formulación es la que genera los valores más altos de VE y, en contraposición, la harina de maíz presentó los valores más bajos (Figura 5.16.A). En el caso de humedad de miga, se observa una tendencia a menores valores de humedad con contenidos mayores de harina de arroz en la formulación mientras que al incrementar la harina de maíz aumentan los valores en esa zona (Figura 5.16.B). La zona central de la gráfica de contorno presentó los valores más bajos de IP asociados a una miga menos oscura, sin embargo, en migas con alta proporción de harina de maíz y arroz se obtuvieron migas más oscuras (Figura 5.16.C).



**Figura 5.16.** Superficie de contorno de: A- Volumen Especifico, B- Humedad de la miga y C- Índice de pardeamiento (IP) de los panificados del diseño de mezcla.

A continuación, la Tabla 5.15, muestra los resultados de los parámetros que definen el alveolado de la miga: área total ocupada por alvéolos, perímetro, tamaño medio y la densidad alveolar para todas las formulaciones del diseño de mezclas.

Para el parámetro área, todas las formulaciones mostraron valores elevados. Las dos formulaciones que mostraron porcentaje ocupado por alveolos menores fueron la 2 (100% harina de arroz) con un valor de  $83,2 \pm 1,0\%$  y la 4 (50% harina de arroz/ 50% harina de maíz) con un área de  $74,7 \pm 1,3\%$ . Esto también se observa más claramente en la Figura 5.16 donde se muestra la superficie de contorno del porcentaje de área ocupada por alveolos y con ayuda de esta figura

podemos decir que en sentido opuesto las mayores áreas de ocupación de alvéolos se ubican en aquellas formulaciones que contienen harina de avena en más del 50%.

**Tabla 5.15.** Parámetros que definen el alveolado de la miga. Área; Perímetro; Tamaño medio del alveolo (TMA) y Densidad Alveolar (DA).

FORMULACION	AREA (%)	PERIMETRO (mm)	TMA (mm)	DA (Alvéolos/cm <sup>2</sup> )
1	91,3±0,5 c	4,15±0,37 abc	0,78±0,10 abc	13±2ab
2	83,2±1,0 b	2,34±0,01 ab	0,19±0,05 a	52±2 c
3	94,4±1,7 cd	3,25±0,20 abc	0,59±0,07 ab	17±2 b
4	74,7±1,3 a	2,25±0,13 a	0,14±0,03 a	73±5d
5	91,2±1,0 c	4,33±0,29 bc	0,95±0,11 abc	11±2ab
6	91,5±0,7 c	2,69±0,20 ab	0,58±0,07 ab	17±2b
7	94,0±0,9 cd	5,06±0,44 cd	1,13±0,31 abc	9±2 ab
8	96,8±0,9 cd	8,39±0,50 e	1,77±0,44 bc	4±1a
9	98,1±0,9 d	10,58±0,59 f	4,80±0,51 d	2±1 a
10	95,4±1,9 cd	6,4±0,64 d	2,27±0,50 c	6±1 ab

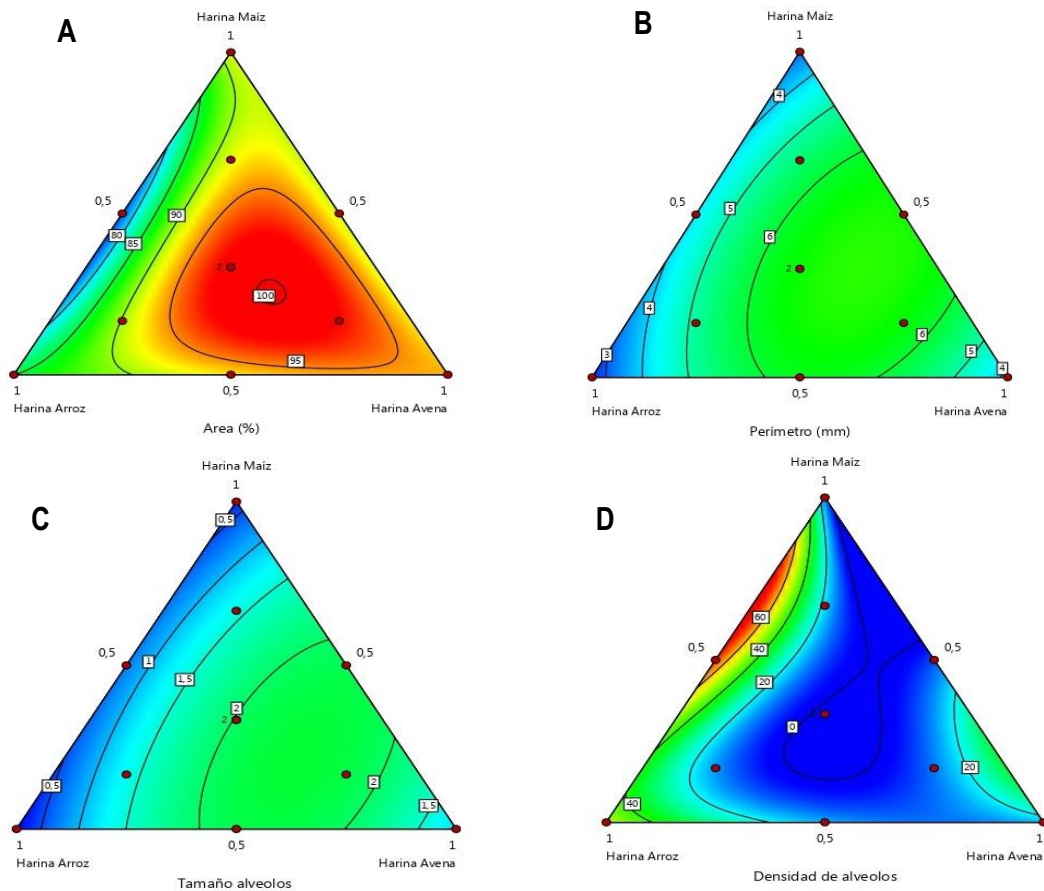
Diferentes letras en una misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

En el caso del parámetro perímetro de los alvéolos, la Tabla 5.15 muestra diferencias significativas entre las formulaciones. Si observamos aquellas cuya composición tiene 100% de un tipo de harina (formulaciones 1, 2 y 3), vemos que no hay diferencias significativas en este parámetro entre las tres formulaciones, ni con las migas con una relación 50/50 de harinas (Formulaciones 4, 5 y 6). Sin embargo, cuando analizamos los puntos 7, 8, 9 (en los cuales un tipo de harina es mayoritaria y ocupa 2/3 partes) los puntos 8 (2/3 corresponden a harina de arroz) y 9 (2/3 corresponden a harina de avena) son las que presentan valores más elevados de perímetro: 8,39±0,50 mm y 10,58±0,59 mm, respectivamente. Un mayor perímetro sugiere un alvéolo de forma irregular menos esférico o un alvéolo esférico más grande. Janssen y col. (2018) estudiaron la relación entre la composición y la funcionalidad de la fase acuosa de las masas sin trigo de diferentes cereales, entre ellos de la avena. Estos autores observaron un aspecto heterogéneo de las migas de panes de avena sin trigo y lo atribuyeron al alto contenido de lípidos que aporta la avena debido a que éstos poseen alta actividad superficial, baja capacidad de formación de espuma y los mismos se ubicarían en la interfase de la fase acuosa del batido. El punto central (10) mostró valores intermedios de perímetro. Sumando a esto la interpretación de la Figura 5.17.A, B, C y D, que muestra la superficie de contorno de todos los parámetros alveolares de la miga, para este

parámetro parecería que la harina de arroz y de avena serían los componentes que aportarían mayor perímetro de alveolos (Figura 5.17.B).

El tamaño medio de los alvéolos mostró diferencias entre los puntos del diseño de mezclas. Los tamaños más reducidos se registraron en las formulaciones con mayor contenido de harina de arroz y/o harina de maíz; aumentando los valores a medida que se incorporó harina de avena (Tabla 5.16). Esto mismo se observó en la Figura 5.17.C, cerca de las harinas de arroz y maíz están los valores más bajos de tamaño alveolar y en contraposición los valores más elevados se ubican en el extremo donde está la harina de avena. Los menores tamaños de alveolos se observaron en la formulación 100% harina de arroz ( $0,19\pm 0,05$  mm) y en la que contenía 50% harina de arroz y 50% harina de maíz ( $0,14\pm 0,03$  mm). El mayor tamaño se detectó en la formulación del punto 9, que contiene 2/3 de harina de avena en su formulación, con un valor de  $4,80\pm 0,509$  mm; el punto central también presentó un elevado tamaño alveolar. En esta formulación 10 habría una sinergia entre las harinas para dar alvéolos más grandes, ya que si calculamos el TMA con los tamaños de las harinas puras y sus porcentajes ( $0.33\times 0.78 + 0.33\times 0.19 + 0.33\times 0.59 = 0.5148$ ) resultaría en un valor muy inferior al experimental. Esta sinergia podría estar dada por la complementariedad de fibra y azúcares aportadas por cada harina; son todos compuestos químicos diferentes con diferente estructura química, lo que favorece la fermentación con diferentes sustratos, potenciando la acción de las enzimas, conduciendo a la producción de burbujas más grandes y por ende alvéolos de mayor tamaño.

En la Figura 5.17.D podemos observar la superficie de contorno para el parámetro densidad alveolar de la miga. Los mayores valores de densidad se ubican en las formulaciones con harina de arroz y/o harina de avena, mientras que los valores más bajos se dan en los puntos con presencia de harina de avena. Es así que, como puede verse en la Tabla 5.16, el punto 2 (harina de arroz al 100%) tuvo valores de densidad de  $52\pm 2$  alvéolos/cm<sup>2</sup>. En contraposición, los valores de menor densidad se dieron en la formulación 9 con 2/3 de harina de avena ( $2\pm 1$  alvéolos/cm<sup>2</sup>): una muy baja DA con un valor muy alto de TMA sugiere una miga aireada de alvéolos grandes.



**Figura 5.17.** Superficie de contorno de: A- Porcentaje de área ocupada por alvéolos en la miga, B- Perímetro de los alvéolos, C- Tamaño de los alvéolos y D- Densidad alveolar de la miga.

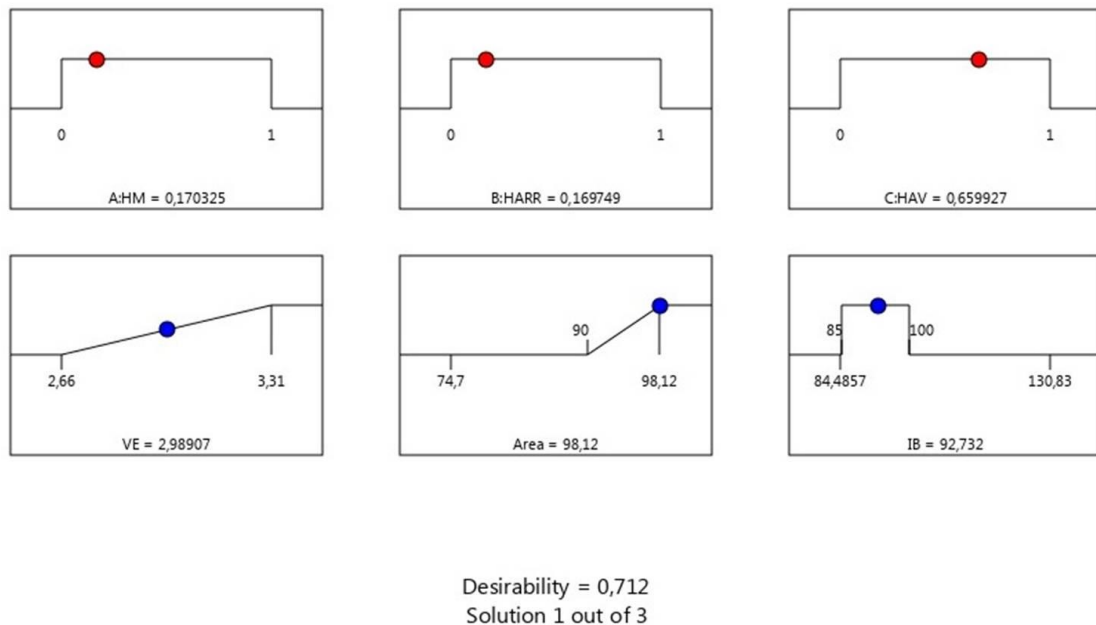
Los resultados en conjunto sugieren que con avena se forman menor número de alvéolos por unidad de área, pero de mayor tamaño medio, sugiriendo la formación de una miga más aireada e irregular, lo cual coincide con lo descrito previamente por Janssen y col. (2018), quienes luego de estudiar panes elaborados con harina de avena describieron sus migas como heterogéneas y lo atribuyeron al elevado contenido de lípidos presentes en este cereal. Las migas con arroz o maíz forman alvéolos más chicos y dan mayor número por  $\text{cm}^2$ , lo que indica una miga un poco más compacta.

## 5.8. Optimización de la formulación del pan sin trigo

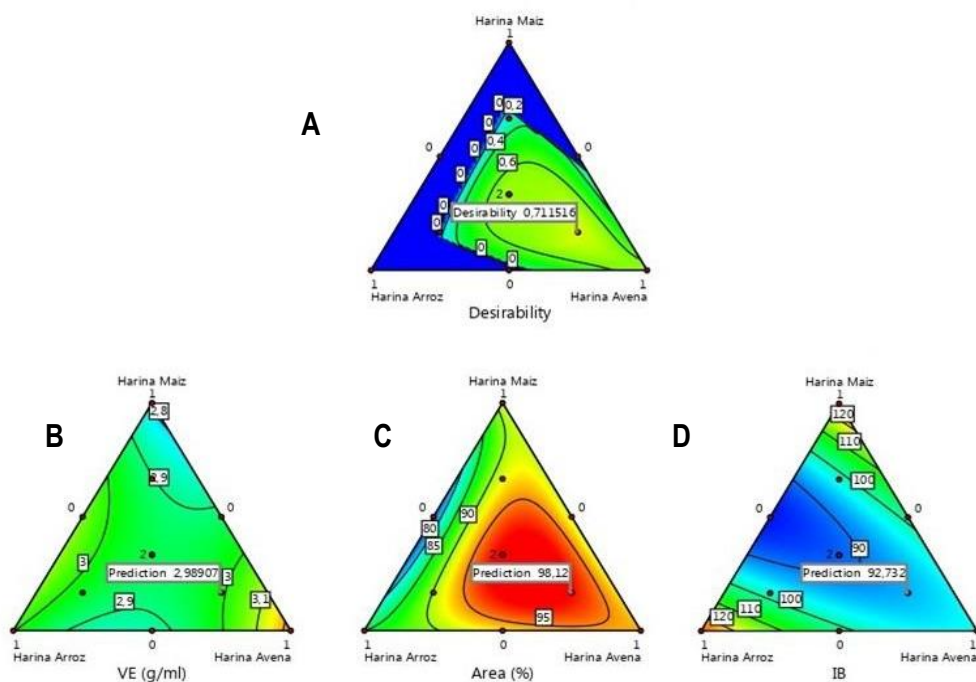
Con el objetivo de lograr una formulación óptima maximizando los resultados de calidad panadera medidos anteriormente, se obtuvo la formulación detallada en la Figura 5.18: 17% harina de maíz + 17% harina de arroz + 66% harina de avena. Con dicha mezcla debería obtenerse un volumen específico de 2,989 g/ml; un área alveolar de 98,12% y un índice de pardeamiento (IP) de 92,72. Esto también se observa en la Figura 5.19, donde se detallan las superficies de contorno de todas las variables utilizadas en la optimización.

Para llegar a esta optimización, las variables cargadas en el programa fueron: volumen específico: maximizar; Área ocupada por alvéolos: 90-98%) y IP: 85-100.

El valor de deseabilidad (“*Desirability*”) estaría indicando la seguridad de alcanzar los resultados detallados de VE, IP y área ocupada por alveolos, con la formulación óptima sugerida. Pueden variar entre 0 y 1, siendo el valor de 1 el valor ideal. La deseabilidad fue de 0,72 por lo que resulta una formulación adecuada.



**Figura 5.18.** Mezcla óptima según el programa DesingExpert 7.0.0.



**Figura 5.19.** Superficie de contorno de: A- Desirability, B- Volumen Especifico (VE), C- Área ocupada por los alvéolos y D- Índice de pardeamiento (IP o IB en inglés) en la miga de la formulación óptima obtenida por el programa DesingExpert 7.0.0.

En la Tabla que se muestra a continuación (Tabla 5.16) se observan los resultados reales obtenidos una vez preparado el pan de la formulación óptima calculada por el programa DesingExpert 7.0.0. Para el volumen específico se obtuvo un valor de  $2,90 \pm 0,052$  g/ml mientras el programa arrojaba un valor de 2,989; en el caso del IP se obtuvo en el laboratorio un valor de  $91,1 \pm 0,7$  vs el valor del programa que fue de 92,73; y por último para el área ocupada por los alvéolos se obtuvo un valor de  $96,7 \pm 0,4\%$  y el esperado fue de 98,12%.

**Tabla 5.16.** Resultados predichos y reales del Volumen Especifico (VE); Índice de pardeamiento (IP) y Área ocupada por los alvéolos de la formulación óptima.

TIPO	VE (cm <sup>3</sup> /g)	IP	AREA ALVEOLAR (%)
Predicho	2,99	92,7	98,12
Real	$2,90 \pm 0,05$	$91,1 \pm 0,7$	$96,7 \pm 0,4$

### 5.9. Evaluación de las características nutricionales del pan óptimo

A continuación, en la Tabla 5.17, se observan los resultados de calidad nutricional arrojados por la formulación óptima del panificado libre de trigo pan o libre de gluten. Se puede observar que tiene un 9,35% de proteínas proveniente de los huevos, leche y de las harinas de arroz, maíz y avena y un 18,23% de lípidos. Además, contiene un  $2,5 \pm 0,1\%$  de fibra dietaria total (sin considerar los  $\beta$ -glucanos, esto es por la metodología utilizada para su obtención) y  $0,8 \pm 0,1\%$  de  $\beta$ -glucanos proveniente de las harinas de los tres cereales utilizados por lo que según el CAA puede definirse un pan “fuente de fibra” porque aporta, en conjunto, más de 3 g de fibra dietaria cada 100 g de pan. Debido a que la ingesta diaria recomendada de fibra dietaria por la OMS es de 25 a 35 g/día, consumir 100 g de pan cubriría alrededor del 13% de la IDR.

**Tabla 5.17.** Composición y análisis nutricional de la formulación óptima. Contenido de Humedad (HUM, %); Contenido de Proteína (PROT, %);  $\beta$ -glucanos (%); Lípidos (%); Cenizas (%) y Fibra Dietaria Total (FDT, %).

<b>HUM</b> <b>(%)</b>	<b>PROT</b> <b>(%)</b>	<b><math>\beta</math>-GLUCANOS</b> <b>(%)</b>	<b>LIPIDOS</b> <b>(%)</b>	<b>CENIZA</b> <b>(%)</b>	<b>FDT</b> <b>(%)</b>
16,16 $\pm$ 0,14	9,35 $\pm$ 0,01	0,8 $\pm$ 0,1	18,23 $\pm$ 0,02	0,030 $\pm$ 0,01	2,5 $\pm$ 0,1



## **CONCLUSIONES PARCIALES**

### **Panes con trigo**

Se realizó la panificación de la muestra control y de las formulaciones con adición de distintas cantidades de harina de avena, se observó el efecto que produjo dicha adición en la aptitud panadera, lo más notable fue la disminución en el volumen específico a medida que la harina de avena aumentaba en la formulación, esto también produjo una disminución en el color de la corteza de los panes.

En la miga, se encontró un aumento significativo de la firmeza y, por lo tanto, de la fuerza de masticación a medida que el porcentaje de avena aumentó en la mezcla, esto estuvo en estrecha relación con la disminución en el volumen específico del pan y en la humedad de la miga. Frente al almacenamiento, estos parámetros de textura y calidad panadera se fueron acrecentando y las migas mostraron ser cada vez más duras, a su vez, la cohesividad disminuyó como consecuencia del mayor desgrane de la miga.

Respecto a la cuestión nutricional, el contenido de proteínas, que ya era elevado en todas las harinas puras, lo siguió siendo en todos los panificados evaluados, el aporte de  $\beta$ -glucanos por parte de la harina de avena fue significativo e incluso mayor a lo hallado en bibliografía. Por su parte, el contenido de cenizas no resultó modificada respecto al pan 100% harina de trigo. Por otro lado, la fibra dietaria total aumentó significativamente. El aporte de lípidos también se vio aumentado por la inclusión de avena en las mezclas.

El análisis de la calidad sensorial arrojó resultados positivos en los atributos seleccionados, logrando altos porcentajes de respuesta con buenas a muy buenas calificaciones dentro de la escala hedónica fijada. La incorporación de la avena al panificado de trigo pan no generó rechazo por parte del consumidor por lo cual estas formulaciones podrían ser adoptadas por los consumidores.

### **Panes sin trigo**

Por último, se logró obtener la formulación de un batido libre de trigo pan, ajustando pasos, tiempos e ingredientes para su elaboración. Esta formulación se maximizó a través del uso de diseño de mezclas para obtener la calidad panadera deseada. En cuanto a las características nutritivas de la formulación óptima podemos decir que el contenido de fibra y  $\beta$ -glucanos (principales

componentes de interés en la avena) resultaron aceptables, teniendo en cuenta que el aporte de 100 g de este pan sería de alrededor del 13% de la ingesta diaria recomendada-IDR.

## CONCLUSIONES FINALES

Las variedades de trigo pan testeadas mostraron buena aptitud panadera, siendo B. Meteoro superior al resto y, por tal motivo, elegida para la confección y evaluación de premezclas con harina de avena y para la preparación y evaluación de calidad de los panes.

En cuanto a las variedades puras de avena disponibles en el mercado argentino, se puede mencionar que todas mostraron contenidos de proteínas y  $\beta$ -glucanos superiores a los citados en bibliografía, lo cual resulta de gran importancia para su uso en la industria panadera como ingredientes para alimentos funcionales. En el caso particular de la variedad Bonaerense INTA Calen, además de las características mencionadas anteriormente, resulta el cultivar más ampliamente sembrado y utilizado en la industria alimenticia y, por tales motivos se eligió para el armado de premezclas y panificados.

La evaluación de vida útil mostró, tanto en las harinas puras como en mezclas, la posibilidad de que sean almacenadas por períodos de 10 meses, sin que se vean comprometidas sus características organolépticas.

Luego de realizar las premezclas harina de trigo-harina de avena, se observó un aporte positivo de los componentes hidrofílicos de la avena. En cuanto a la formación de la red de gluten, la harina de avena no mostró impedimentos, aunque sí se produjeron cambios en atributos texturales como resultado del alto contenido en fibra dietaria, lo que condujo a un desarrollo diferente de la red de gluten. Las masas obtenidas con las mezclas resultaron más tenaces y con un comportamiento farinográfico totalmente opuesto al que generalmente ocurre: a mayor contenido de harina de avena en la premezcla, tanto la estabilidad como el aflojamiento disminuyeron. La textura de las masas fue más dura y gomosa a medida que aumentaba la proporción de harina de avena en las mezclas. También se evidenció una tendencia marcada a la disminución de la adhesividad, producto de la incorporación del agua como componente estructural.

Para los panificados con trigo, se evidenció que la incorporación de harina de avena condujo a panes de menor volumen específico con migas más firmes y con mayor desgrane. Con respecto a las características nutricionales, se observó un aporte positivo y creciente en proteína,  $\beta$ -glucanos y lípidos, lo cual resultó sumamente positivo para mejorar el perfil nutricional de estos

productos. La evaluación sensorial de estos panes evidenció que la incorporación de harina de avena no provocaría rechazo por parte de los consumidores.

Finalmente, la realización de batidos libres de trigo pan dio como resultado panes con mejoras en los contenidos de fibra y  $\beta$ -glucanos, mostrando ser una alternativa interesante desde el punto de vista nutricional para personas con algún tipo de alergia al gluten o proteínas de trigo.

## BIBLIOGRAFIA

AACC International. 2000. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 10th ed. American Association of Cereal Chemists: St. Paul, MN.

Aaltonen K, Laurikka P, Huhtala H, Mäki M, Kaukinen K y Kurppa K. 2017. The long-term consumption of oats in celiac disease patients is safe: a large cross-sectional study. *Nutrients*, 9: 611.

Abbate PE. 2017. El trigo, su difusión, importancia como alimento y consume. En: Manual del cultivo de trigo. International Plant Nutrition Institute (IPNI). Editores: Guillermo A Divito y Fernando O Gracia.

Abecassis J, Chaurand M y Autran JC. 1997. Structural basis of grain hardness and technological consequences. *International Agrophysics*, 11: 273- 281.

Ali A.; A. Shehzad; M.R. Khan, M.A. Shabbir & M.R. Amjid. (2012). Yeast, its types and role in fermentation during bread making process-A. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 22(3): 171-179.

Alimentos Argentinos. 2019. Harina de trigo informe ejecutivo. Subsecretaría de Alimentos y Bebidas Secretaría de Alimentos y Bioeconomía. Ministerio de Agroindustria de la Nación. Argentina. [http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos/Cadenas%20de%20Valor%20de%20Alimentos%20y%20Bebidas/informes/Resumen\\_Cadena\\_2019\\_HARINA\\_DE\\_TRIGO\\_MARZO\\_2019.pdf](http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos/Cadenas%20de%20Valor%20de%20Alimentos%20y%20Bebidas/informes/Resumen_Cadena_2019_HARINA_DE_TRIGO_MARZO_2019.pdf)

Alvídrez-Morales A, González-Martínez BE y Jiménez-Salas Z. 2002. Tendencias en la producción de alimentos: alimentos funcionales. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 3 (3): 1-6.

Andersson A y Börjesdotter D. 2011. Effects of environment and variety on content and molecular weight of  $\beta$ -glucan in oats. *Journal of Cereal Science*, 54 (1): 122–128.

Antoine C, Lullien-Pellerin V, Abecassis J y Rouau X. 2002. Nutritional interest of the wheat seed aleurone layer. *Sciences des Aliments*, 22: 545- 556.

Ao Z y Jane JL. 2007. Characterization and modeling of the A- and B- granule starches of wheat, triticale, and barley. *Carbohydrate Polymers*, 67: 46–55.

Arfvidsson C, Wahlund KG y Eliasson AC. 2004. Direct molecular weight determination in the evaluation of dissolution methods for unreduced glutenin. *Journal of Cereal Science*, 39: 1–8.

Atwell WA. 1998. Method for reducing syruing in refrigerated doughs. Patent Application WO 97/26794.

Baik MY y Chinachoti P. 2000. Moisture redistribution and phase transition during bread staling. *Cereal Chemistry*, 77: 484-488

Bárcenas ME, Benedito C y Rosell MC. 2004. Use of hydrocolloids as bread improvers in interrupted baking process with frozen storage. *Food Hydrocolloids*. 769-774.

Belefant-Miller H y Grace SC. 2010. Variations in bran carotenoid levels within and between rice subgroups. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65: 358-363.

Beloshapka AN, Buff PR, Fahey GC y Swanson KS. 2016. Compositional analysis of whole grains, processed grains, grain co-products, and other carbohydrate sources with applicability to pet animal nutrition. *Foods*, 5 (2): 23.

Belton PS. 1999. On the elasticity of wheat gluten. *Journal of Cereal Science*, 29: 103- 107.

Belton PS. 2003. The molecular basis of dough rheology. Capítulo 13 en: *Breadmaking Improving Quality*.

Editado por Stanley P. Cauvain. Publicado por Woodhead Publishing Limited, Cambridge-Inglaterra.

Bettge AD y Morris CF. 2000. Relationships among grain hardness, pentosan fractions and end-use quality of wheat. *Cereal Chemistry*, 77 (2): 241-247.

Bigne F. 2016. Aplicación de harina de fruto de algarrobo en el desarrollo de productos panificados saludables. Trabajo de tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Exactas. Departamento de Ciencias Biológicas.

Bigne F, Romero A, Ferrero C., Puppo MC y Guerrero A. 2021. New thermal and rheological approaches of chickpea–wheat dough for breadmaking. *European Food Research and Technology*, 247(5): 1107-1115.

Bijlwan M, Naik B, Sharma D, Singh A y Kumar V. 2019. Recent developments in dough based bakery products: A mini review. *The Pharma Innovation Journal*, 8(5): 654-658.

Blanco Canalis MS, León AE y Ribotta PD. 2019. Incorporation of dietary fiber on the cookie dough. Effects on thermal properties and water availability. *Food Chemistry*. 271: 309–317.

Boczkowska M y Onysk A. 2016. Unused genetic resources: a case study of Polish common oat germplasm. *Annals of Applied Biology*, 169(1), 155-165.

Borkowska H, Grundas S y Styk B. 1999. Influence of nitrogen fertilization of winter wheat on its gluten quality. *International Agrophysics*, 13, 333-335.

Boyacı IH, Williams y Köksel H. 2004. A rapid method for the estimation of damaged starch in wheat flours. *Journal of Cereal Science*, 39: 139-145.

Brennan CS y Cleary LJ. 2005. The potential use of cereal (1-3, 1-4)  $\beta$ -D-glucanos as functional food ingredients. *Journal of Cereal Science* 42: 1-13.

Buera MP, Retriella C y Lozano RD. 1985. Definition of colour in the non-enzymatic browning. *Die Farbe*, 33: 316-326.

Buerstmayr H, Krenn N, Stephan U, Grausgruber H y Zechner E. 2007. Agronomic performance and quality of oat (*Avena sativa* L.) genotypes of worldwide origin produced under Central European growing conditions. *Field Crops Research* 101: 343–351.

Butt MS, Tahir-Nadeem M, Khan MKI, Shabir R y Butt MS. 2008. Oat: unique among the cereals. *European Journal of Nutrition*, vol. 47, no. 2, pp. 68–79.

Campbell GM, Fang C y Muhamad II. 2007. On predicting roller milling performance VI - Effect of kernel hardness and shape on the particle size distribution from first break milling of wheat. *Food and Bioproducts Processing*. 85 (1): 7-23.

Catterall P. 1998. La molienda - Capítulo 12- en: Fabricación de pan. Editado por Cauvain, S.P; Young, L.S. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España.

Cauvain SP. 2002. Pan: el producto- Capítulo 1; Procesos de panificación- Capítulo 2. En: Fabricación de pan. Editado por Cauvain, S.P. y Young, L.S. Editorial Acribia S.A, Zaragoza, España.

Chagman PG y Huamán JZ. 2010. Sustitución parcial de harina de trigo *Triticum aestivum* L. por harina de *kiwicha* *Amaranthus caudatus* L., usando el método directo y esponja y masa, en la elaboración de pan. *Revista Sociedad Química del Perú*, 76 (4): 377-388.

Chang C, Zhang HP, Xu J, Li WH, Liu GT, You MS y Li BY. 2006. Identification of allelic variations of puroindoline genes controlling grain hardness in wheat using a modified denaturing PAGE. *Euphytica*, 152:

225-234.

Charalampopoulos D, Wang R, Pandiella SS y Webb C. 2002. Application of cereals and cereal components in functional foods: a review. *International Journal of Food Microbiology*, 79: 131–141.

Chung OK, Pomeranz Y y Finney KF. 1978. Wheat flour lipids in breadmaking. *Cereal Chemistry*, 55 (5): 598-618.

Codex Alimentarius. NORMA PARA LA HARINA DE TRIGO. CXS 152-1985. Adoptada en 1985. Revisada en 1995. Enmendada en 2016, 2019. Consultada en marzo del 2020.

Código Alimentario Argentino (CAA). 2023. Tomo I-a. Capítulos IX (Art. 661-Res. 167) y XVII. [http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas\\_alimentos\\_caa.asp](http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp). Accedido 07/07/2019.

Cohen IS, Day AS, Shaoul R. 2019. To be oats or not to be? An update on the ongoing debate on oats for patients with celiac disease. *Frontiers in Pediatric*, 7: 384. <https://doi.org/10.3389/fped.2019.00384>

Collar C. 2006. Novel high fibre and whole grain breads. In: *Technology of Functional Cereal Products. Part 3 Particular products*. Ed: Bruce Hamaker, Director, Whistler Center for Carbohydrate Research, Purdue University, USA. Woodhead Publishing Limited.

Collar C. 2007. Cereales Menores: Avena, Sorgo y Mijo. En: *De tales harinas, tales panes. Granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica*. Ed: Alberto Edel León- Cristina M. Rosell.

Comino I, de Lourdes MM y Sousa C. 2015. Role of oats in celiac disease. *World Journal of Gastroenterol*, 21:11825–11831.

Comité de Cereales de Invierno de la Comisión Nacional de Semillas, 2021. Calidad industrial de variedades de trigo pan. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. <https://www.argentina.gob.ar/inase/red-de-ensayos-comparativos-de-variedades-de-trigo/grupo-de-calidad-de-trigo-pan>

Correa MJ, Añon MC, Perez GT y Ferrero C. 2010. Effect of modified celluloses on dough rheology and microstructure. *Food Research International*, 43: 780-787.

Cubadda R, Carcea M, Pasqui LA y PertenH. 1991. Metodo rapido di valutazione della qualità del glutine delle semole e del grano duro. *Chimicadei Cereali. Tecnica molitoria*, 861-874.

Czerniejewski CP, Shank CW., Bechtel WG. y Bradley WB. 1964. The mineral of wheat flour and bread. *Cereal Chemistry*. 41: 65-72.

Czuchajowska Z y Pomeranz Y. 1989. Differential scanning calorimetry, water activity, and moisture content in crumb center and near-crust zones of bread during storage. *Cereal Chemistry*, 66: 305-309.

de la Horra A.E., Seghezzo M.L., Molfese E., Ribotta P.D. y León A.E. 2012. Indicadores de calidad de las harinas de trigo: índice de calidad industrial y su relación con ensayos predictivos. *Agriscientia*, Vol. XXIX (2): 81-89.

Decker EA, Devin JR y Decker S. 2014. Processing of oats and the impact of processing operations on nutrition and health benefits. *British Journal of Nutrition*, 112: S58-S64.

Dengate HN. 1984. Swelling, pasting and gelling of wheat starch. *Advances in Cereal Science and Technology*, 6: 49-82.

Denli E y Ercan R. 2001. Effect of added pentosans isolated from wheat and rye grain on some properties of bread. *European Food Research Technology*, 212: 374-376.

- De Erive, M.O.; He, F.; Wang, T. y Chen, G. Development of  $\beta$ -glucan enriched wheat bread using soluble oat fiber. *J. Cereal Sci.* 2020, 95, 103051.
- Dewettinck K, Van Bockstaele F, Kühne B, Van de Walle D, Courtens TM y Gellynck X. 2008. Nutritional value of bread: Influence of processing, food interaction and consumer perception. *Journal of Cereal Science.* 48: 243-257.
- Dexter J y Symons S. 2007. Impact of durum wheat test weight, kernel size, kernel weight, and protein content on semolina milling potential. *International Miller*, (4th Quarter): 27-33.
- Dickey W. 2008. Making oats safer for patients with coeliac disease. *European Journal of Gastroenterology and Hepatology*, vol. 20 (6): 494-495.
- Dimitri Milán J. 1978. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. 3ro Ed. Tomo I. Familia Gramíneas, 145-149.
- Diplock AT, Agget PJ, Ashwell M, Bornet F, Fern EB y Roberfroid MB. 1999. Scientific concepts of functional foods in Europe. Consensus document. *The British journal of nutrition.* 81: S1-S27.
- Djordjević M, Djordjević M, Šoronja-Simović D, Nikolić I y Šereš Z. 2022. Delving into the Role of Dietary Fiber in Gluten-Free Bread Formulations: Integrating Fundamental Rheological, Technological, Sensory, and Nutritional Aspects. *Polysaccharides.* 3: 59-82.
- Dreher ML. 2001. Dietary Fiber Overview. En S. S. Cho (Ed.), *Handbook of dietary fiber*. Marcel Dekker, Inc. Primera Edición: 1-16.
- Dobraszczyk BJ y Morgenstern MP. 2003. Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science*, 38: 229-245.
- D'Ovidio R y Masci S. 2004. The low-molecular-weight glutenin subunits of wheat gluten. *Journal of Cereal Sciences*, 39 (3):321-339.
- Dupont FM y Altenbach SB. 2003. Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *Journal of Cereal Science*, 38: 133-146.
- Eliasson AC. 2003. Starch structure and bread quality. Capítulo 7 en: *Breadmaking Improving Quality*. Editado por Stanley P. Cauvain. Woodhead Publishing Limited. Cambridge, Inglaterra.
- Enciclopedia Británica, 1996. <https://www.britannica.com/topic/oats>.
- Erben M, Piagentini AM y Osella CA. 2015. Kinetics of Color Development in Fortified Cookies. *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 3 (5): 196-202.
- Escudero Álvarez E y González Sánchez P. 2006. La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria*, 21: 61-72.
- FAOSTAT, 2019. Estadísticas Organization de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Fardet A, Rock E y Rémésy C. 2008. Is the in Vitro Antioxidant Potential of Whole-Grain Cereals and Cereal Products Well Reflected in Vivo?. *Journal of Cereal Science.* 48: 258-276.
- FDA (2013). Guidance for Industry: A Food Labeling Guide (10. Appendix B: Additional Requirements for Nutrient Content Claims). Disponible en: <http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/LabelingNutrition/ucm064916.htm>. Accedido 14/12/2015.



Fellows P. 2009. Food Processing Technology: Principles and Practice. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Fenn D, Lukow OM, Humphreys G, Fields PG y Boye JI. 2010. Wheat-Legume Composite Flour Quality. *International Journal of Food Proprieties*. 13: 381-393.

Flander L., Salmenkallio-Marttila M., Suortti T, Autio K. 2007. Optimization of Ingredients and Baking Process for Improved Wholemeal Oat Bread Quality. In *LWT– Food Science and Technology*. 40 (7): 860-870.

Flander L, Suortti T, Katina K y Poutanen K. 2011. Effects of wheat sourdough process on the quality of mixed oat-wheat bread. *Food Science and Technology*. 44: 656-664.

Fric P, Gabrovská D y Nevoral J. 2011. Celiac disease, gluten-free diet, and oats. *Nutrition Reviews*, 69: 107–115.

Gambuś H, Gibiński M, Pastuszka D, Mickowska B, Ziobro R y Witkowicz R. 2011. The application of residual oats flour in bread production in order to improve its quality and biological value of protein. In: *ACTA Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*. 10 (3): 317-325.

Garnero S, Sposetti P, Garnero J, Luengo F y Yafar E. 2016. Pentosanos totales y solubles en la fracción de harina de variedades de trigos argentinos. Libro CYTAL-2016. 325-330.

Garsed K y Scott BB. 2007. Can oats be taken in a gluten-free diet?. A systematic review. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*. 42 (2): 171–178.

Gatti S, Caporelli N, Galeazzi T, Francavilla R, Barbato M, Roggero P, Malamisura B, Iacono G, Budeli A, Gesuita R, Catassi C y Lionetti E. 2013. Oats in the diet of children with celiac disease: preliminary results of a double-blind, randomized, placebo-controlled multicenter Italian study. *Nutrients* 5:4653– 4664.

Gibiński M, Augustyn G, Gambuś H, Mickowska B, Nowakowski K, Pastuszka D y Sabat R. 2010. Wykorzystanie mąki owsianej – produktu ubocznego przy produkcji koncentratu z owsa – w piekarstwie. In *ZYWNOŚĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, 3 (70): 56-75.

Gordon DT. 1999. Defining dietary fiber-a progress report. *Cereal Foods World*. 44 (5): 336.

Gormley TR y Morrissey A. 1993. A note of the evaluation of wheaten breads containing oat flour or oat flakes. *Irish Journal of Agriculture and Food Research*. 32: 205-209.

Gray JA y Bemiller JN. 2003. Bread Staling: Molecular Basis and Control. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2: 1-21.

Guardianelli LM., Salinas MV. y Puppo MC. 2022. Quality of wheat breads enriched with flour from germinated amaranth seeds. *Food Science and Technology International*, 28 (5), 388-396.

Hager AS y Wolter A. 2012. Investigation of product quality, sensory profile and ultrastructure of breads made from a range of commercial gluten-free flours compared to their wheat counterparts. *European Food Research Technology*, 235: 333-344.

Hajšelová M. 2003. Analysing wheat and flour. Capítulo 9 en: *Bread making Improving Quality*. Editado por Stanley P. Cauvain. Publicado por Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Inglaterra.

Hashimoto S, Shogren M, Pomeranz Y. 1987. Cereal pentosans: estimation and significance. I. Pentosans in wheat and milled wheat products. *Cereal Chemistry*. 64: 30-34.

Hassan BH, Alhamdan AM, Elansari AM. 2005. Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity. *Journal of Food Engineering*, 66: 439-445.

Havrlentová M, Petrušáková Z, Burgárová A, Gago F y Sturdik E. 2011. Cereal  $\beta$ -glucans and their significance for the preparation of functional foods – a review. *Czech Journal Food of Sciences*, 29: 1-14.

He H y Hosoney RC. 1990. Changes in bread firmness and moisture during long term storage. *Cereal Chemistry*, 67: 603-605.

He ZH, Liu L, Xia XC, Liu JJ y Pena RJ. 2005. Composition of HMW and LMW glutenin subunits and their effects on dough properties, pan bread, and noodle quality of Chinese bread wheats. *Cereal Chemistry*, 82 (4), 345-350.

Hoffmann LA. 1995. World production and use of oats. In: Welch, R.W.(Ed.), *The Oat Crop—Production and Utilization*. Chapman and Hall, London, pp. 34–61.

Hosoney RC, Rogers DE. 1990. The formation and properties of wheat flour doughs. *Food Science and Nutrition*, 29 (2): 73-93.

Hosoney RC. 1991. *Principios de Ciencia y Tecnología de los cereales*. Editorial Acribia. Zaragoza. España. 88-91.

Hosoney RC. 1994. Gluten proteins. En: *Principles of Cereal Science and Technology*. 2° edición. Editado por Hosoney RC. American Association of Cereal Chemists, Estados Unidos. pp. 197-211.

Howitt CA, Tamás L, Solomon RG, Gras PW, Morell MK, Békés F y Appels R. 2003. Modifying flour to improve functionality. Capítulo 11 en: *Breadmaking Improving Quality* Editado por Stanley P. Cauvain. Publicado por Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Inglaterra.

Hu XZ, Zheng JM., Li XP, Xu C y Zhao Q. 2014. Chemical composition and sensory characteristics of oat flakes: A comparative study of naked oat flakes from China and hulled oat flakes from western countries. *Journal of Cereal Science*. 60 (2): 297–301.

Hug-Iten S, Escher F y Conde-Petit B. 2003. Staling of Bread: Role of Amylose and Amylopectin and Influence of Starch-Degrading Enzymes. *Cereal Chemistry*. 80 (6): 654–661.

IRAM 15855 (2000). Determinación farinográfica en harinas.

IRAM 15862 (2003). Evaluación del Índice de caída.

IRAM 15815 (2006). Determinación contenido de cenizas.

IRAM 15.854-I y 15.854-II (2008). Acondicionamiento y molienda de trigo pan.

IRAM 15850-1 (2009). Determinación del contenido de humedad.

IRAM 15857 (2012). Determinación alveográfica en harinas.

IRAM 15864- II (2013). Determinación de gluten húmedo, seco e índice de gluten.

Izydorczyk MS, Biliaderis CG y Bushuk W. 1990. Oxidative gelation studies of water-soluble pentosans from wheat. *Journal of Cereal Science*. 11: 153-169.

Izydorczyk MS, Biliaderis CG y Bushuk W. 1991. Comparison of the structure and composition of water-soluble pentosans from different wheat varieties. *Cereal Chemistry*. 68: 139-144.

Janssen F, Wouters AGB, Pauly A y Delcour JA. 2018. Relating the composition and air/ water interfacial

- properties of wheat, rye, barley, and oat dough liquor. *Food Chemistry*. 264, 126-134.
- Jelaca SL y Hlynka I. 1972. Effect of wheat-flour pentosans in dough, gluten and bread. *Cereal Chemistry*. 49: 489-495.
- Jericho H, Assiri A y Guandalini S. 2016. Celiac Disease and Wheat Intolerance Syndrome: a Critical Update and Reappraisal. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 64 (1): 15-21.
- Kang JY, Kang AHY, Green A, Gwee KA y Ho KI. 2013. Systematic review: worldwide variation in the frequency of coeliac disease and changes over time. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics*. 38 (3): 226–245.
- Kaukinen K, Collin P, Huhtala H y Mäki M. 2013. Long-term consumption of oats in adult celiac disease patients. *Nutrients* 5:4380– 4389.
- Kent N. 1987. *Tecnología de los cereales*. Ed. Acribia S.A. Madrid. España.
- Keying Q., Changzhong R. y Zaigui L. 2009. An investigation on pretreatments for inactivation of lipase in naked oat kernels using microwave heating. *Journal of Food Engineering*. 95: 280–284.
- Khan K., Zhu J., Huang DY, Borneo R. 2002. Glutenin size distribution, determined by multi-stacking SDS-PAGE: Relationship to Breadmaking Quality. Capítulo 5 en: *Cereal Chemists*, Minnesota, Estados Unidos.
- Kim SK y D' Appolonia BL. 1977a. Effect of pentosans on retrogradation of wheat starch gels. *Cereal Chemistry*, 54: 150- 160.
- Kim SK y D' Appolonia B.L. 1977b. Bread staling studies III. Effect of pentosans on dough bread and bread staling rate. *Cereal Chemistry*, 54: 225- 229.
- Krochmal-Marczak B, Tobiasz-Salach R y Kaszuba J. 2020. The effect of adding oat flour on the nutritional and sensory quality of wheat bread. *British Food Journal*., 122, 2329–2339.
- Komlenić DK, Ugarčić-Hardi Ž, Jukić M, Planinić M, Bucić-Kojić A y Strelec I. 2010. Wheat dough rheology and bread quality effected by *Lactobacillus brevis* preferment, dry sourdough and lactic acid addition. *International Journal of Food Science and Technology*, 45 (7): 1417–1425.
- Koskinen O, Villanen M, Korponay-Szabo I, Lindfors K, Mäki M y Kaukinen K. 2009. Oats do not induce systemic or mucosal auto- antibody response in children with celiac disease. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 48:559–565.
- Kosová K, Leišová-Svobodová L y Dvořáček L. 2020. Oats as a Safe Alternative to Triticeae Cereals for People Suffering from Celiac Disease? A Review. *Plant Foods for Human Nutrition* <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00800-8>
- Koubaier HBH, Snoussi A, Essaidi, Chabir M, Bouzouita N. 2015. Cake quality evaluation made of wheat–lentil flour blends, *Journal new sciences, Agriculture and Biotechnology*, 17: 937-942.
- Krystallis A, Maglaras G y Mamalis S. 2008. Motivations and cognitive structures of consumers in their purchasing of functional foods. *Food Quality and Preference*, 19 (6): 525-538.
- Kugler WF y Godoy EF. 1964. *Cereales Mayores*. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Editorial ACME S.A.C.I. Buenos Aires.
- Lau TC, Chan MW, Tan, HP y Kwek CL. 2012. Functional food: A growing trend among the health conscious. *Asian Social Science*, 9 (1): 198-208.

- Lee MR, Swanson BG y Baik BK. 2001. Influence of amylose content on properties of wheat starch and breadmaking quality of starch and gluten blends. *Cereal Chemistry*, 78 (6): 701-706.
- Lehtinen P, Kiliainen K, Lehtom I. Y Laakso S. 2003. Effect of Heat Treatment on Lipid Stability in Processed Oats. *Journal of Cereal Science*, 37: 215-221.
- Li W, Dobraszczyk BJ y Schofield JD. 2003. Stress relaxation behavior of wheat dough, gluten and gluten protein fractions. *Cereal Chemistry*, 80 (3): 333-338.
- Liatis S, Tsapogas P, Chala E, Dimosthenopoulos C, Kyriakopoulos K, Kapantais E y Katsilambros N. 2009. The consumption of bread enriched with beta-glucan reduces LDL-cholesterol and improves insulin resistance in patients with type 2 diabetes. *Diabetes and Metabolism*, 35(2): 115-120.
- Lima I y Singh RP. 2001. Viscoelastic behaviour of fried potato crust. *Journal of Texture Studies*, 32: 131-141.
- Lindsay MP y Skerritt JH. 1999. The glutenin macropolymer of wheat flour doughs: structure-function perspectives. *Trend in Food Science and Technology*. 10: 247-253.
- Lionetti E, Gatti S, Galeazzi T, Caporelli N, Francavilla R, Cucchiara S, Roggero P, Malamisura B, Iacono G, Tomarchio S, Kleon W, Restani P, Brusca I, Budelli A, Gesuita R, Carle F y Catassi C. 2018. Safety of oats in children with celiac disease. *Journal of Pediatrics*, 194:116–122.
- Litwinek D., Gambuś H, Zięć G, Sabat R, Wywrocka-Gurgu A y Berski W. 2021. The comparison of quality and chemical composition of breads baked with residual and commercial oat flours and wheat flour. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2 (Special issue 1): 1734-1743.
- Liu ZH, Wang HY, Wang XE, Zhang GP, Chen PD y Liu DJ. 2006. Genotypic and spike positional difference in grain phytase activity, phytate, inorganic phosphorus, iron, and zinc contents in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Cereal Science*, 44: 212–219.
- Llumiquinga Chuqui NA. 2022. Efecto de la adición de harinas no convencionales para la producción y enriquecimiento de productos de panificación y pastelería (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Carrera de Ingeniería en Alimentos). Repositorio: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/34932>
- Lohi S, Mustalahti K, Kaukinen K. 2007. Increasing prevalence of coeliac disease over time. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics*, 26 (9): 1217–1225.
- Londono, D.M.; Gilissen, L.J.; Visser, R.G.; Smulders, M.J. y Hamer, R.J. 2015. Understanding the role of oat beta-glucan in oat-based dough systems. *Journal of Cereal Sciences*. 62, 1–7.
- Lopes-da-Silva JA, Santos DMJ, Freitas A, Brites C, Gil AM. 2007. Rheological and nuclear magnetic resonance (NMR) study of hydration and heating of undeveloped wheat doughs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 55: 5636-5644.
- Lundin KE, Nilsen EM, Scott HG, Løberg EM, Gjøen A Bratlie J. Skar, V, Mendez E, Løvik A y Kett, K. 2003. Oats induced villous atrophy in coeliac disease. *Gut*, 52: 1649–1652.
- Lunn J y Theobald HE. 2006. The health effects of dietary unsaturated fatty acids. *Nutrition Bulletin*, 31(3), 178-224.
- Mabille F, Grill J y Abecassis J. 2001. Mechanical properties of wheat seed coats. *Cereal Chemistry*. 78(3): 231-235.

- Maloney DH y Foy JJ. 2003. Yeast Fermentations. Capítulo 3 en: Handbook of Dough Fermentations editado por Kulp, K. y Lorenz, K. Marcel dekker, inc. Nueva York, Estados Unidos.
- Manthey FA, Hareland GA y Huseby DJ. 1999. Soluble and Insoluble Dietary Fiber Content and Composition in Oat. Cereal Chemistry Journal, 76 (3): 417–420.
- Mariotti M, Pagani MA y 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.
- Martin ML y Hoseney RC. 1991. A mechanism of bread firming I. Role of starch swelling. Cereal Chemistry. 68: 498-503.
- Marshall A., Cowan S, Edwards S, Griffiths I, Howarth C. y Langdon T. 2013. Crops that feed the world 9. Oats – a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications. Food Security, 5 (1): 13–33.
- Masi P, Cavella S y Sepe M. 1998. Characterization of dynamic viscoelastic behavior of wheat flour dough at different moisture content. Cereal chemistry, 75 (5): 428-432.
- Marlett, J. A. 2001. Dietary Fiber and Cardiovascular Disease. En S. Cho Sungsoo & M. L. Dreher (Eds.), Handbook of dietary fiber (1-14). Marcel Dekker, Inc. New York, Estados Unidos.
- Matz S. 1999. Ingredients from wheat. En: Bakery Technology and Engineering. Tercera Edición. Editado por Matz S. Pan-Tech International, Estados Unidos. 1-21.
- McKechnie R. 1983. Oat products in bakery foods. Cereal Foods World. 28: 635-637.
- Michniewicz J, Biliaderis CG y Bushuk W. 1991. Effect of added pentosans on some physical and technological characteristics of dough and gluten. Cereal Chemistry. 68: 252-258.
- Miles MJ, Morris VJ, Orford PD, Ring SG. 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelatinization and retrogradation of starch. Carbohydrate Research. 135: 271-281.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la nación. [https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/estimaciones/archivos/estimaciones/200000\\_2020/190600\\_Junio/200618\\_Informe%20Mensual%2018-06-20.pdf](https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/estimaciones/archivos/estimaciones/200000_2020/190600_Junio/200618_Informe%20Mensual%2018-06-20.pdf). Consulta agosto, 2020.
- Mis A, Grundas S, Dziki D y Laskowski J. 2012. Use of farinograph measurements for predicting extensograph traits of bread dough enriched with carob fiber and oat wholemeal. Journal of Food Engineering, 108 (1): 1-12.
- Mohammed I, Ahmed AR y Senge B. 2012. Dough rheology and bread quality of wheat–chickpea flour blends. Industrial Crops and Products, 36 (1): 196-202.
- Morad MM y D'Appolonia BL. 1980. Effect of surfactants and baking procedure on total water-soluble starch in bread crumb. Cereal Chemistry, 57: 141-144.
- Moreno C. 2012. Un tema complejo. Revista Alimentos Argentinos 55, 60-63.
- Ng P y Bushuk W. 1988. Statistical relationships between high molecular weight subunits of glutenin and breadmaking quality of Canadian-grown wheats. Cereal Chemistry, 65: 408-412.
- Ng P, Xu C y Bushuk W. 1991. Model of glutenin structure based on farinograph and electrophoretic results. Cereal Chemistry. 68: 231-235.
- Olagnero G, Abad A y Bendersky S. 2007. Alimentos funcionales: fibra, prebióticos, probióticos y simbióticos. Dieta, 14. Recuperado a partir de

[http://www.fmed.uba.ar/depto/nutrinormal/funcionales\\_fibra.pdf](http://www.fmed.uba.ar/depto/nutrinormal/funcionales_fibra.pdf)

Olivera Carrión M. 2007. Functional Foods in Argentina. The World of Food Science., revista electrónica del Institute of Food Technology (IFT) and International Union of Food Science and Technologies (IUFoST). Disponible en: <http://www.worldfoodscience.org/cms/>

Ooi VE y Liu F. 2000. Immunomodulation and anti-cancer activity of polysaccharide-protein complexes. *Current medicinal chemistry*, 7(7): 715-729.

Oomah BD. 1983. Baking and related properties of wheat-oat composite flours. *Cereal Chemistry*, 60: 220-225.

Ortiz C, Valenzuela R y Yalda Lucero A. 2016. Enfermedad celíaca, sensibilidad no celíaca al gluten y alergia al trigo: comparación de patologías diferentes gatilladas por un mismo alimento. *Revista Chilena de Pediatría. Sociedad Chilena de Pediatría*, 88 (3): 417-423.

Osborne TB. 1924. *The Vegetable Proteins*. Logmans, Green and Co. Londres.

Oxentenko AS y Murray JA. 2015. Celiac disease: ten things that every gastroenterologist should know. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, 13 (8): 1396–1404.

Paesani C. 2020. Efecto de la composición y las propiedades fisicoquímicas de harinas integrales de genotipo de trigos duros y blandos sobre la calidad tecnológica de panes y galletitas (Master's thesis). <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/28224/14279%20tesis%202018%20Paesani.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Panfili G, Fratianni A y Distaam M. 2004. Improved normal-phase high-performance liquid chromatography procedure for the determination of carotenoids in cereals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52: 6373-6377.

Pateras I. 1998. Bread Spoilage y Staling. En: *Technology of Breadmaking*. Eds S P Cauvain and L S Young, London, Blackie Academic & Professional. 240–261.

Peterson DM. 1998. Malting Oats: Effects on Chemical Composition of Hull-less and Hulled Genotypes. *Cereal Chemistry*, 75 (2): 230–234.

Peterson DM. 1999. Lipase Activity and Lipid Metabolism During Oat Malting. *Cereal Chemistry*, 76 (1): 159-163.

Peterson, D., 2001. Oat antioxidants. *Journal of Cereal Sciences*, 33 (2): 115–129.

Philippe S, Saulnie L yGuillon F. 2006. Arabinoxylan and (1/3), (1/4)- $\beta$ -glucan deposition in cell walls during wheat endosperm development. *Planta*, 224: 449–461.

Piazza L y Masi P. 1995. Moisture redistribution throughout the bread loaf during staling and its effect on mechanical properties. *Cereal Chemistry*, 72: 320-325.

Ponzio NR. 2010. Calidad panadera de variedades de trigo puras y sus mezclas. Influencia del agregado de aditivos. Tesis de Magister Scientiae. Universidad Nacional de la Plata- Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

Popa A, Duta D y Niculita P. 2012. Recent advances in oat-based functional cereal products. *Romanian Biotechnological Letters*, 17 (6): 7717-7725.

Rahmani J, Miri A, Černevičiūtė R, Thompson J, Nisa de Souza N, Sultana R, Kord Varkanehg H, Mohammad Mousavi S y Hekmatdoosth A. 2019. Effects of cereal beta-glucan consumption on body weight,

body mass index, waist circumference and total energy intake: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Complementary Therapies in Medicine*, 43:131-139.

Rashid M, Butzner D, Burrows V, Zarkadas M, Case S, Molloy M, Warren R, Pulido O y Switzer C. 2007. Consumption of pure oats by individuals with celiac disease: a position statement by the Canadian celiac association. *Canadian Journal of Gastroenterology*, 21:649-651.

Ribotta PD, Amulphi S, Leon AE y Añón MC. 2005. Effect of soybean addition on the rheological properties and breadmaking quality of wheat flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85 (11): 1889-1896.

Rieder A, Holtekjolen AK, Sahlstrom S y Moldestad A. 2012. Effects of barley and oat flour types and sourdoughs on dough rheology and bread quality of composite wheat bread. *Journal of Cereal Science*. 55: 44-52.

Ritchie S, Swanson SJ y Gilroy S. 2000. Physiology of the aleurone layer and starchy endosperm during grain development and early seedling growth: new insights from cell and molecular biology. *Seed Science Research*, 10: 193-212.

Roberfroid MB. 1999. What is beneficial for health? The concept of functional food. *Food and Chemical Toxicology*, 37: 1039-1041.

Rodríguez-Sandoval E, Fernández-Quintero A y Alaya-Aponte A. 2005. Reología y textura de masas: aplicaciones en trigo y maíz. *Ingeniería e Investigación*, 57: 72-78.

Rodríguez-Sandoval E, Fernández-Quintero A y Cuvelier G. 2009. Stress relaxation of reconstituted cassava dough. *LWT- Food Science and Technology*, 42: 202-206.

Rouau X y Moreau D. 1993. Modification of some physicochemical properties of wheat flour pentosans by an enzyme complex recommended for baking. *Cereal Chemistry*. 70: 626-632.

Rouau X, Ei-Hayek ML y Moreau D. 1994. Effect of an enzyme preparation containing pentosanases on the bread-making quality of flours in relation to changes in pentosan properties. *Journal of Cereal Science*, 19: 259-272.

Rubel IA. 2015. Estudio de las propiedades físico-químicas, organolépticas y nutricionales de productos panificados desarrollados utilizando ingredientes no tradicionales con propiedades funcionales. Tesis doctoral en ciencia y tecnología de los alimentos. Universidad Nacional del Sur. Repositorio digital: <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/2695/Tesis%20Irene%20Rubel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ryan D, Kendall M y Robards K. 2007. Bioactivity of oats as it relates to cardiovascular disease. *Nutrition Research Reviews*, 20 (2): 147-162.

Salinas MV. 2013. Estudio de la calidad panadera, sensorial y nutricional de panes elaborados con harina de trigo fortificada con sales de calcio e inulina. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de La Plata.

Salinas MV, Carbas B, Brites C y Puppo MC. 2015. Influence of Different Carob Fruit Flours (*Ceratonia siliqua* L.) on Wheat Dough Performance and Bread Quality. *Food and Bioprocess Technology*. 8 (7): 1561-1570.

Sánchez Almaraz R, Fuentes MM, Palma Milla S, López Plaza B, Bermejo López LM y Gómez Candela C. 2015. Revisión. Indicaciones de diferentes tipos de fibra en distintas patologías. *Nutrición Hospitalaria*. 31(6): 2372-2383. ISSN 0212-1611.

Sapone A, Lammers KM y Mazzarella G. 2010. Differential Mucosal IL-17 Expression in Two Gliadin-

Induced Disorders: Gluten Sensitivity and the Autoimmune Enteropathy Celiac Disease. *International Archives of Allergy and Immunology*, 152 (1): 75-80.

Schlörmann W., Zetzmann S., Wiege B., Haase NU, Greiling A, Lorkowski S, Dawczynski C y Gleis M. 2020. Impact of different roasting conditions on sensory properties and health-related compounds of oat products. *Food Chemistry* 307. 125548

Sciammaro LP. 2015. Caracterización fisicoquímica de vainas y harinas de algarrobo (*Prosopis alba* y *Prosopis nigra*). Tesis Doctoral. FCEX-UNLP. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/51407>.

Seghezzo y Molfese, 2006. Calidad de trigo pan. *Boletín técnico* N° 41. ISSN 0327-8735.

Seghezzo ML. 2014. Calidad en trigo candeal. Primera edición. Tres Arroyos, Buenos Aires: Ediciones INTA. ISBN 978-987-521-615-0.

Sellappan K, Datta K, Parkhi V y Datta S. 2009. Rice caryopsis structure in relation to distribution of micronutrients (iron, zinc,  $\beta$ -carotene) of rice cultivars including transgenic indica rice. *Plant Science*, 177: 557-562.

Senasa 2004. Norma de comercialización de Trigo pan. Sancionada 14 de diciembre del 2004.

Serrano Fuster M. 2020. Estudio de la cinética de retrogradación del almidón y del endurecimiento de la miga de panes libres de gluten (Tesis de maestría). <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/14652/13557%20RT%20RDU.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sey MSL, Parfitt J y Gregor J. 2011. Prospective study of clinical and histological safety of pure and uncontaminated Canadian oats in the management of celiac disease. *Journal of Parenteral Enteral Nutrition*, 35: 459–464.

Shewry PR, Tatham AS, Forde J, Kreis M y Mifflin BJ. 1986. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *Journal of Cereal Science*. 4: 97-106.

Shewry PR., Popinea U Y, Lafiandra D, Belton P. 2001. Wheat glutenin subunits and dough elasticity: findings of the EUROWHEAT project. *Food Science and Technology*. 11: 433-441.

Shewry PR y Halford NG. 2002. Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*, Vol.53, No. 370, Inorganic Nitrogen Assimilation Special Issue, pp. 947–958.

Silveira Rodríguez MB, Monereo Megías S y Molina Baena B. 2003. Alimentos funcionales y nutrición óptima: ¿Cerca o lejos? *Revista española de salud pública*. 77(3): 317-331.

Singh H y MacRitchie F. 2001. Application of Polymer Science to Properties of Gluten. *Journal of Cereal Science*. 33: 231–243.

Sivam AS, Sun-Waterhouse D, Quek S y Perera CO. 2010. Properties of bread dough with added fiber polysaccharides and phenolic antioxidants: a review. *Journal of food science*. 75(8): 163-174.

Skrabanja V, Kreft I, Golob T, Modic M, Ikeda S y Ikeda K. 2014. Nutrient content in buckwheat milling fractions. *Cereal Chemistry*. 81(2):172-176.

Sreerama YN, Sashikala VB y Pratapa VM. 2010. Variability in the fraction of chickpea and horse gram: evaluation of their antioxidant properties. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 58 (14): 8322-30.

Sroan BS, Bean SR y MacRitchie F. 2009. Mechanism of gas cell stabilization in bread making. I. The



- primary gluten–starch matrix. *Journal of Cereal Science*, 49: 32–40.
- Stauffer C. 1998. Fundamentos de formación de la masa. Fabricación de pan. Editado por Cauvain, S. y Young, L. Acribia, Zaragoza.
- Stauffer CE. 2007. Principles of Dough Formation. En: *Technology of Breadmaking*, 2° ed. Springer Estados Unidos. 309-310.
- Steffe JF. 1996. *Rheological methods in food process engineering*. Segunda edición. East Lansing: Freeman Press.
- Sterna V, Zute S y Brunava L. 2016. Oat grain composition and its nutrition benefice. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 8: 252 – 256.
- Tamba-Berehoiu, R.M.; Cristea, S.; Negoita, M.; Popa, C.N.; Turtoi, M.O. 2019. Bread making potential assessment of wheat-oat composite flours *Romanian Biotechnological Letters*. 24, 522–530.
- Tan J, Baisakh N, Oliva N, Parkhi V, Rai M, Torrizo L, Datta K y Datta SK. 2005. The screening of rice germplasm, including those transgenic rice lines which accumulate  $\beta$ -carotene in their polished seeds, for their carotenoid profile. *International Journal of Food Science & Technologies*, 40: 563-569.
- Tarabiono C. 1979. *Manuale pratico per la macinazione del grano*. Editorial CHIRIOTTI, Italia.
- Tatham AS, Mifflin BJ y Shewry PR. 1985. The beta-turn conformation in wheat gluten proteins: Relationship to gluten elasticity. *Cereal Chemistry*. 62: 405-412.
- Tjellström B, Stenhammar L, Sundqvist T, Fälth-Magnusson K, Hollén E, Magnusson KE, Norin E, Midtvedt T y Högberg L. 2014. The effects of oats on the function of gut microflora in children with coeliac disease. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics*, 39: 1156– 1160.
- Tuire I, Maria-Leena L, Teea S, Katri H, Jukka P, Paivi S, Heini H, Markku M, Pekka C y Katri K. 2012. Persistent duodenal intraepithelial lymphocytosis despite a long-term strict gluten-free diet in celiac disease. *American Journal of Gastroenterology*, 107: 1563–1569.
- Turnbull KM y Rahman S. 2002. Endosperm texture in wheat. *Journal of Cereal Science*. 36: 327-337.
- Tye-Din J y Anderson R. 2008. Immunopathogenesis of celiac disease. *Current Gastroenterology Reports*. (5): 458–465. Vasiljevic T, Kealy T y Mishra V.K. 2007. Effects of  $\beta$ -Glucan Addition to a Probiotic Containing Yogurt. *Journal of Food Science*. 72- 7.
- Volman JJ, Mensink RP, Ramakers JD, de Winther MP, Carlsen H, Blomhoff R, et al. Dietary (1 $\rightarrow$ 3), (1 $\rightarrow$ 4)- $\beta$ -d-glucans from oat activate nuclear factor- $\kappa$ B in intestinal leukocytes and enterocytes from mice. *Nutr Res*. 2010;30(1):40-8.
- Wang J, Rosell CM, de Barber CB. 2002. Effect of the addition of different fibres on wheat dough performances and bread quality. *Food Chemistry*, 79: 221-226.
- Wang M. 2003. *Effect of Pentosans on Gluten Formation and Properties*. Tesis de grado. Wageningen Universiteit.
- Wang Q y Ellis PR. 2014. Oat beta-glucan: Physico-chemical characteristics in relation to its blood-glucose and cholesterol-lowering properties. *British Journal of Nutrition*, (2): S14-S13.
- Wang L.; Ye F.; Li S.; Wei F.; Chen J.; Zhao G. 2017. Wheat flour enriched with oat beta-glucan: A study of hydration, rheological and fermentation properties of dough. *Journal of Cereal Science*. 75, 143–150.

- Webb C y Owens GW. 2003. Milling and flour quality. Capítulo 10. En: Breadmaking improving Quality. Editado por Stanley P. Cauvain. Ed. Wood head Publishing Limited. Cambridge, Inglaterra.
- Weegels PL, de Groot AMG, Verhoek JA y Hamer RJ. 1994. Effects on Gluten of Heating at Different Moisture Contents. II. Changes in Physico-Chemical Properties and Secondary Structure. *Journal of Cereal Science*. 19 (1): 39-47.
- Weherhane L. 2009. Evaluación de parámetros de calidad molinera de avenas en Argentina. Tesis Maestría UNS. Bahía Blanca.
- Wheat Marketing Center. 2004. Wheat and Flour testing methods: A guide to understanding wheat and flour quality. Portland, Oregon. Estados Unidos.
- Wieser H. 2007. Chemistry of gluten proteins. *Food Microbiology*, 24: 115-119.
- Yadav N, Roopa BS y Bhattacharya S. 2005. Viscoelasticity of a Simulated Polymer and Comparison with Chickpea Flour Doughs. *Journal of Food Science*, 70 (4): 273.
- Yujuan G, Xiaojie Q, Binghua S, Sen M, Xiaoling T y Xiaoxi W. 2022. Nutritional composition and physicochemical properties of oat flour sieving fractions with different particle size. *Food Science and Technology*. 154. 112757.
- Zhang DC, Moore WR y Doehlert D.C. 1998. Effects of oat grain hydrothermal treatments on wheat-oat flour dough properties and breadbaking quality. In *Cereal Chemistry*, 75 (5): 602-605.
- Zhou M, Robards K, Glennie-Holmes M y Helliwell S. 1998. Structure and pasting properties of oat starch. *Cereal Chemistry*, 75 (3), 273-281.
- Zielinski H, Ciska E y Kozłowska H. 2001. The cereal grains: Focus on vitamin E, Czech. *Journal of Food Science*. 19: 182–188.
- Zwer PK. 2004. OAT: En: Wrigley C, Corke H y Walker C (Eds). *Encyclopedia of Grain Science*. Elsevier.