CAPÍTULO 10
Trigo pan: calidad

Ana Carolina Castro

El trigo pan (*Triticum aestivum* L.) es un cereal de gran versatilidad ya que la masa que se obtiene con su harina tiene propiedades viscoelásticas únicas que permite la realización de diversos productos panificados y pastas. También el grano puede almacenarse por tiempos prolongados con relativa facilidad. Estos atributos han hecho del trigo un cultivo ampliamente difundido con un mercado de exportación importante y un vasto uso en la industria alimenticia (Peña, 2007).

El concepto **calidad de trigo** involucra varios aspectos y puede ser definido según el eslabón de la cadena productiva que se considere. De esta forma, para un **productor** será de buena calidad aquel cultivar que tenga alto rendimiento en grano y buen comportamiento sanitario. Para un **molinero** será de buena calidad aquel trigo que sea limpio, sano y seco, con elevado rendimiento de harina y bajo contenido de cenizas. Un **panadero** apreciará buena calidad cuando reciba materias primas con características constantes, que le permitan uniformar sus procesos de fabricación, trabajar las masas sin inconvenientes y obtener productos homogéneos. Finalmente, el **consumidor** valora la calidad de un panificado cuando encuentra en él, valor nutricional y cualidades agradables.

Podemos decir que la calidad es un concepto **multidimensional** porque incluye aspectos físicos, tecnológicos, nutricionales y sanitarios. Además, es **variable** porque cambia según el mercado, las especificaciones de las industrias y los gustos y preferencias de los consumidores que se modifican en el tiempo.

¿Cuáles son los factores que influyen en la calidad del trigo pan?

La calidad del trigo pan depende de diversos factores: el ambiente (clima, suelo, presencia de adversidades bióticas), el genotipo (elección del cultivar según aptitud panadera), la interacción genotipo-ambiente y el manejo agronómico que se realice durante el ciclo del cultivo, cosecha y posterior almacenamiento. Es necesario comprender que la calidad del trigo se genera a través de todo el ciclo del cultivo. Inclusive, antes de la siembra, las decisiones agronómicas que se toman, en cuanto a la elección del lote donde será sembrado, a la fecha de siembra, a la realización de un correcto barbecho, al manejo de la fertilización y de las adversidades bióticas resultan factores prioritarios para definir la calidad.

La **elección del lote** donde sembrar el trigo es muy importante, aspectos tales como la historia del lote, su cultivo antecesor, los herbicidas que se han utilizado, la presencia de inóculo en el rastrojo son factores que incidirán en el rendimiento del cultivo y en la calidad. Establecer la **fecha de siembra** adecuada para no exponer al trigo a posibles heladas en el período crítico (floración) o a altas temperaturas en el llenado de grano que perjudiquen la calidad es otra decisión de manejo de gran relevancia. En Argentina, las fechas de siembra varían entre principios de mayo y principios de julio para cultivares de ciclo largo y entre la segunda quincena de junio y principios de agosto para cultivares de ciclo más corto (Miralles *et al*., 2014).

Si bien la calidad del trigo se genera a través del ciclo del cultivo, la etapa llamada **llenado de grano** es fundamental para la generación de la calidad ya que es en este momento en el cual se forman las estructuras de los granos y se acumulan las proteínas y los hidratos de carbono, principalmente almidón. Como se indicó en el capítulo 3 “Trigo: crecimiento y desarrollo: etapa reproductiva y llenado de grano”, el llenado de grano se divide en tres fases: lag o cuaje, llenado efectivo y madurez fisiológica. La **fase *lag* o cuaje** sucede en los primeros 15-20 días desde antesis y tiene lugar una división celular activa en la cual se define el número de células endospermáticas y así el peso potencial del grano. Una vez finalizada esta etapa, queda establecido el componente principal del rendimiento (número de granos del cultivo) (Brocklehurst, 1977).

Luego sucede la etapa de **llenado efectivo** en la cual el grano acumula la mayor parte de su **peso** seco, el cual queda determinado por la cantidad de materia seca acumulada en el grano por unidad de tiempo (**tasa de llenado**) y por la duración de la etapa entre fin de fase *lag* y madurez fisiológica (**duración de llenado**). La acumulación de agua en el grano continúa durante esta etapa hasta que el contenido hídrico se hace constante (*plateau hídrico*), y finaliza al alcanzar la madurez fisiológica (Brocklehurst, 1977).

En la **madurez fisiológica** la humedad del grano oscila entre 36% y 41% (Calderini *et al*., 2000; Álvarez Prado *et al*., 2013). En este momento el rendimiento del cultivo está determinado. El grano perderá agua hasta la humedad de cosecha (14-16%). La fuente principal de hidratos de carbono lo constituye la fotosíntesis de las hojas durante el llenado de granos y en menor medida la removilización de reservas y fotosíntesis de la espiga.

Acumulación de proteínas en el grano

Como se indicó en el capítulo 3 “Trigo: crecimiento y desarrollo: etapa reproductiva y llenado de grano”, en la fase de división celular, se acumulan principalmente proteínas metabólicas (albúminas y globulinas). Posteriormente, en la etapa de llenado efectivo, ocurre la acumulación más importante de las proteínas de reserva (**gliadinas y gluteninas**). La relación gliadinas/gluteninas tiene importancia en las propiedades viscoelásticas de las masas. Es importante destacar que los distintos tipos de proteínas de reserva se depositan en diferentes momentos durante el llenado efectivo de los granos. En tanto que las gliadinas comienzan a formarse

alrededor de 5 -10 días después de la floración, las gluteninas son detectables alrededor de 20 días después de este evento. Por ese motivo, situaciones de estrés (enfermedades, déficit hídrico, altas temperaturas) que alteren el llenado de granos **puede afectar la composición de las proteínas**, especialmente en la relación gliadinas/gluteninas. La síntesis de gliadinas se afecta en menor medida que la de gluteninas con temperaturas elevadas, lo que determina una mayor relación gliadinas/gluteninas. Las masas serán flojas y pegajosas (Stone & Savin, 1999), difíciles de trabajar en la industria.

Influencia de las condiciones ambientales en la calidad del trigo

El clima es decisivo durante el ciclo del cultivo, pero especialmente en el **período crítico** (20 días antes de floración y 5 a 10 días después) y en el llenado de grano que cumple un rol muy importante en la expresión de la calidad. Las temperaturas superiores a los 25-30 °C y baja humedad relativa durante el llenado de grano producen acortamiento del período, que se traduce en **granos chuzos**, con menor rendimiento molinero y modificación en la composición de las proteínas, con la consiguiente reducción en la calidad. Este defecto suele producirse en la subregión ecológica VN. Otra causa de grano chuzo es la ocurrencia de estrés hídrico que reduce la tasa y la duración del llenado. Si las temperaturas son altas y se combinan con vientos secos y cálidos puede ocurrir el **arrebato** de los granos, defecto que puede observarse en la subregión I. Contrariamente, si las temperaturas son bajas, hay nubosidad y alta humedad relativa durante el llenado de grano, el ciclo se alargará y el grano continuará acumulando hidratos de carbono. Esto produce el **grano panza blanca** que tiene gran contenido de almidón y menos contenido proteico y de gluten lo que ocasiona dificultades en la calidad panadera (Phillips & Nieremberger, 1976). Cuanto más largo el período de llenado, mayor ocurrencia de granos panza blanca y se acentúa cuando la disponibilidad de N (nitrógeno) es baja (Möckel & Cantamutto, 1984). Este defecto comercial puede ocurrir en las subregiones III, IV y VS.

Por otro lado, cuando ocurren lluvias previo a la cosecha, el grano absorbe el agua, se hincha, y al secarse nuevamente no recobra su tamaño original. Esto provoca **grano lavado** con fracturas internas que disminuyen la densidad y el peso hectolítrico (PH), afectando así el rendimiento molinero (Brach, 2012). Asimismo, las precipitaciones, pueden producir **brotado del grano** aumentando la cantidad de enzima alfa amilasa, lo que licua el almidón originando trigos que darán masas pegajosas de difícil manejo en la industria.

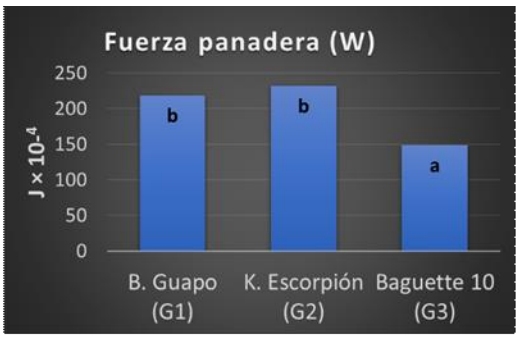
Teniendo en cuenta la diversidad de ambientes que existen en las subregiones de cultivo de trigo, es posible predecir los defectos comerciales que podrían encontrarse. Cada campaña agrícola se caracteriza por condiciones meteorológicas diferentes, años con mayores o menores precipitaciones generan condiciones más o menos predisponentes para la presencia de estos defectos. Anualmente se publican informes de cosecha que reúnen datos de los parámetros de calidad comercial e industrial de todas las subregiones ecológicas. Esta información es elaborada por instituciones públicas INTA (Instituto Nacional de

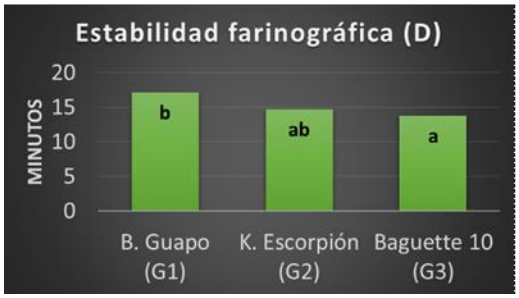
Tecnología Agropecuaria) y privadas (Granotec, Bolsa de Cereales) y puede obtenerse a través de internet.

Elección de cultivares

En Argentina el Comité de los Cereales de Invierno y la Comisión Nacional de Semillas (CONASE) clasifican los cultivares de trigo en tres grupos de calidad según el PH, el porcentaje de cenizas, el rendimiento molinero, el contenido de proteína y gluten, la estabilidad farinográfica y el W alveográfico. El grupo 1 (G 1) son los trigos correctores utilizados para panificación directa e industrial, principalmente para elaborar pan de molde, panes para hamburguesa, panchos y pan dulce. Exigen altos valores de fuerza panadera (W mayor a 330 J x 10^{-4}) y gluten mayor a 30%. El grupo 2 (G 2) son trigos que soportan más de 8 h de fermentación en procesos de panificación tradicional sobre tablas, dando panes tipo francés, criollo. Se requieren W alveográficos mayores a 280 J x 10^{-4} y valores de gluten entre 28 y 30%. Por último, el grupo 3 (G 3) se caracteriza por trigos que son usados para panificación directa y soportan menos de 8 h de fermentación (Cuniberti, 2005; PRONACATRI, 2006). Estos trigos se usan en la elaboración de galletitas, facturas, miñones. Requieren W alveográfico entre 230 J x 10^{-4} y 280 J x 10^{-4} y un gluten de 27% (Seghezzo & Molfese, 2006).

Los cultivares de G 1 presentan buena aptitud panadera como puede apreciarse en los parámetros reológicos fuerza panadera (W), estabilidad farinográfica (D) y volumen de pan (Fig. 10.1) mientras que cultivares del G 3 presentan valores menores (Castro, 2016). Generalmente, existe una relación inversa entre rendimiento y proteína. Los cultivares de G 1 son excelentes en aptitud panadera, pero comúnmente de menor rendimiento mientras que los cultivares de G 3 son de inferior calidad, pero de buenos rendimientos en grano (Fig. 10.2). El INTA ha realizado ensayos buscando un equilibrio entre rendimiento y calidad al sembrar mezclas de dos variedades de similar ciclo y peso de mil granos (PMG), una de ellas con buena aptitud panadera y menor potencial de rendimiento y la otra con menor aptitud panadera y alto potencial de rendimiento. La inclusión en la mezcla de una variedad con buena aptitud panadera produjo valores de proteína superiores a 11% por lo cual recibió bonificación en la comercialización. No obstante, el análisis de los márgenes brutos mostró que los mayores ingresos se produjeron en las variedades de mayor rendimiento (Torrens Baudrix & Ventimiglia, 2020).





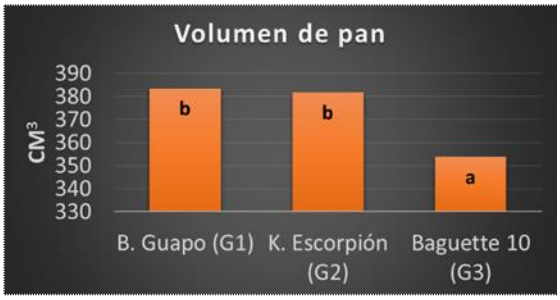
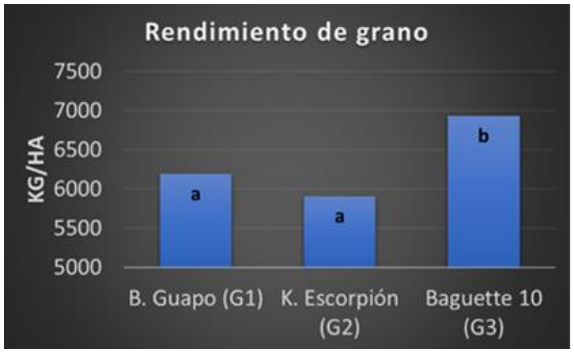


Fig. 10.1. Fuerza panadera (W), estabilidad farinográfica (D) y volumen de pan en tres variedades de trigo pan de grupo de calidad diferente. Las letras diferentes entre cultivares indican diferencias estadísticas significativas según test LSD p < 0,05. (Castro, 2016).



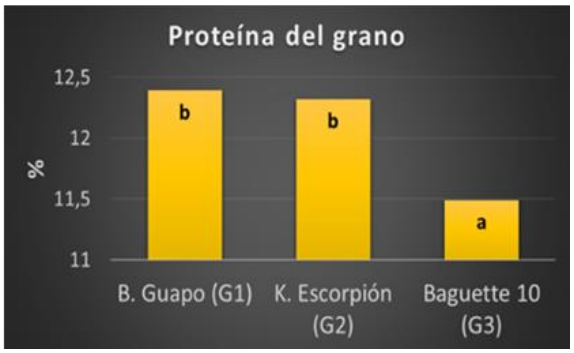


Fig. 10.2. Rendimiento de grano (Kg/ha) y proteína del grano (%) en tres variedades de trigo pan de grupo de calidad diferente. Las letras diferentes entre cultivares indican diferencias estadísticas significativas según test LSD p < 0,05. (Castro, 2016).

Entre el 60 y 80% del trigo que se siembra en Argentina es de G 1 y G 2 de buena calidad panadera. La clasificación de los distintos cultivares comerciales inscriptos en Argentina se encuentra disponible en la página web del INASE (www.inase.gov.ar). Debido a la alta interacción genotipo-ambiente para la calidad industrial y a la posibilidad de tener que modificar criterios, esta clasificación no es rígida y se actualiza anualmente. También existe la página https://cultivaresargentinos.com/trigo/ en la que se lista el grupo de calidad de los cultivares de trigo pan comercializados en Argentina.

Influencia de la fertilización nitrogenada y azufrada en la calidad

La proteína tiene su origen en el N inorgánico del suelo, natural o químico, que se transforma luego en N orgánico en el grano. El trigo requiere 30 kg $N.t^{-1}$ de grano producido. Se

considera que, en la floración, el trigo ya absorbió el 80% del N y el resto se removilizará hasta la madurez. Se debe realizar un análisis de suelo para evaluar el contenido de materia orgánica presente.

El momento de aplicación del fertilizante es muy importante en la definición de la calidad. El N aplicado únicamente en la siembra, en general no es suficiente para incrementar rendimiento y proteínas a la vez. Esto se observa particularmente en los años de altos rendimientos, si la oferta del N fue escasa. En situaciones como éstas, los porcentajes de proteína en grano suelen ser bajos, debido a la relación inversa que existe entre rendimiento y proteína, comúnmente llamado “efecto de dilución” (Brach, 2012).

Savin & Sorlino (2003) explican que la aplicación de fertilizante nitrogenado en dosis bajas, cuando hay deficiencia del nutriente tiende a aumentar el rendimiento de grano (Fig. 10.3 fase I) siendo eficiente en la formación de flores fértiles y granos. En esta instancia, el porcentaje de proteína de los granos tiende a disminuir ya que se licúa en la mayor cantidad de granos. En la fase II de la Fig. 10.3 se observa que dosis mayores de N incrementan el rendimiento en grano, pero no tan pronunciado como la fase anterior y el porcentaje de proteína puede aumentar. En la fase III de la Fig. 10.3 se aprecia que el agregado de una dosis mayor de N genera una estabilización del rendimiento y la proteína aumenta.

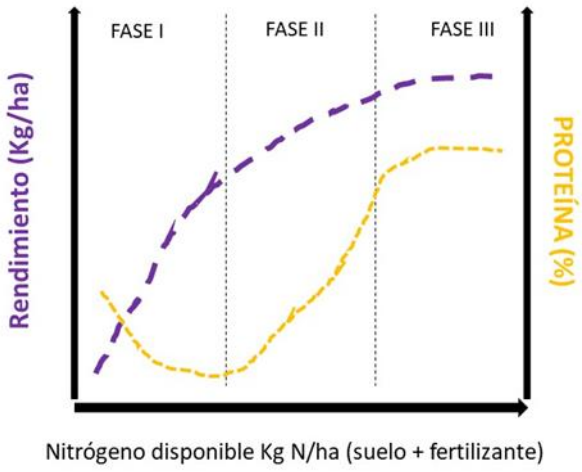


Fig. 10.3. Rendimiento y proteína en grano en función del N disponible en el suelo más el fertilizante. Adaptado de Stone & Savin (1999).

Por eso es muy importante considerar las fertilizaciones en siembra y en macollaje, como un buen momento para mejorar el rendimiento y la calidad. Las aplicaciones de N tardías (fines de macollaje, encañazón, hoja bandera) pueden aumentar la proteína en el grano y las realizadas antes de la ocurrencia de la floración o durante la misma no siempre tienen respuesta a proteína, ya que depende mucho del ambiente (Cuniberti, 1996). Las gliadinas y gluteninas contienen apreciables cantidades de aminoácidos azufrados, por lo tanto, la fertilización con azufre permite mejorar la calidad panadera, especialmente en los planteos productivos con alta fertilización nitrogenada y elevados rendimientos (Alzueta *et al*., 2017).

Las enfermedades del trigo afectan la calidad

Enfermedades foliares fúngicas

La presencia de enfermedades depende fundamentalmente de las condiciones meteorológicas predominantes durante el ciclo del cultivo. Si bien existe una amplia variedad de patógenos, las enfermedades de origen fúngico son las más importantes y dentro de éstas, las foliares son las que prevalecen. El efecto que pueden generar en la calidad va a depender considerablemente del hábito nutricional que el patógeno posea, aquí podemos encontrar los biótrofos como *Puccinia triticina* Eriks, agente causal de la **roya de la hoja**, organismos que necesitan del hospedante vivo para poder alimentarse, provocando generalmente mayor daño sobre la acumulación y partición del N en el grano que el que provocan sobre la acumulación y partición de la materia seca (Dimmock & Gooding, 2002; Schierenbeck *et al*., 2019). De este modo, generalmente ocasionan una disminución en el contenido de proteína en el grano. Por otro lado, los necrótrofos como *Pyrenophora tritici-repentis* (Died) Shoem, agente causal de la **mancha amarilla**, son microorganismos que provocan la muerte del hospedante para poder alimentarse, éstos provocan una disminución del área foliar fotosintéticamente activa, reducen la fotosíntesis y la acumulación de carbohidratos principalmente y afectando más el rendimiento que la acumulación de N, provocando generalmente un incremento en el porcentaje de proteína (Dimmock & Gooding, 2002; Schierenbeck *et al*., 2019). Finalmente, se encuentran los patógenos hemibiótrofos como *Zymoseptoria tritici*, agente causal de la **mancha de la hoja**, que tienen un efecto variable sobre la calidad. Hay pruebas que sugieren que regularmente disminuyen el rendimiento de proteína en grano por unidad de superficie, reduciendo tanto la captación como partición de N al grano (Mc Cabe *et al*., 2001). Sin embargo, otros investigadores han encontrado una disminución del rendimiento e incrementos en el contenido de proteína debido a un proceso de concentración (Dimmock & Gooding 2002; Castro & Simón, 2017).

Enfermedades de la espiga

La **fusariosis** o golpe blanco es ocasionada por el hongo *Fusarium graminearum,* productor de micotoxinas, metabolitos fúngicos que afectan granos y forrajes, y cuya ingestión, inhalación o absorción cutánea resulta tóxica para animales y personas (Bartosik *et al*., 2012). Entre tales toxinas se destacan los tricotecenos como el deoxynivalenol (DON, también conocido como vomitoxina), la toxina T-2, el nivalenol (NIV), la toxina HT-2 y el diacetoxyscirpenol (DAS).

La fusariosis afecta la calidad comercial, molinera e industrial. La calidad comercial se perjudica ya que disminuye el PH y el PMG, produce granos con aspecto yesoso, livianos, blanquecinos, con zonas rosadas (micelio del hongo) de bajo PH. En la norma de comercialización estos granos reciben el nombre de granos calcinados. También puede observarse en los granos afectados un aumento de proteína (por efecto de concentración). Con respecto a la influencia de la fusariosis en la calidad molinera e industrial, se produce un aumento de cenizas y

acidez en harina, la coloración de las harinas se torna amarillento-grisáceo. Desde el punto de vista reológico, ocurre una disminución del W alveográfico y de los parámetros del farinograma absorción de agua, desarrollo de la masa y estabilidad por activación de proteasas, peroxidasas y catalasas. Las masas son pegajosas con olor y sabor típico (Bartosik *et al*., 2012).

La concentración de DON se puede reducir (no eliminar) con limpieza del grano. La micotoxina no se destruye en la molienda, y tampoco en la cocción (Withney, 2018), por eso es necesario controlar su cantidad en trigos panificables. Existe un reglamento internacional (1881/2006) que establece límites tolerables para la toxina DON en diferentes alimentos. Para trigo blando admite un máximo de 1250 µg/kg y para trigo duro 1750 µg/kg. En Argentina, el Código Alimentario Argentino (Artículo 156) fija un límite de 1000 µg/kg de DON para harina, sémola, semolina, hojuelas y copos de trigo. Además, fija tolerancias máximas permitidas de otras micotoxinas en alimentos a base de cereales.

En este sentido, Bartosik *et al*. (2012) sugieren recomendaciones para el manejo de granos afectados que consisten en identificar lotes con *Fusarium* para evitar la mezcla en la logística de la cosecha y almacenamiento. Durante la cosecha regular la máquina (cabezal, sistema trilla y limpieza) para minimizar la trilla de granos enfermos y favorecer en la limpieza el vuelo de granos de menor peso, ya que los granos que tienen *Fusarium* son más livianos que los granos sanos. Intentar realizar la cosecha con mayor humedad (18%). En el acopio se promueve un exhaustivo muestreo de los granos en la recepción, los granos afectados se limpiarán con sistema de ventilación forzada con grano ligeramente húmedo. Ante la evidencia de *Fusarium* se debe cuantificar la concentración. En el almacenamiento la humedad debe ser menor a 14% para evitar el desarrollo de hongos.

Es muy importante aclarar que, si bien existen recomendaciones como las anteriormente dichas, la limpieza de granos con *Fusarium* no es sencilla, porque hay una gran cantidad de granos enfermos o parcialmente enfermos, que tienen prácticamente el mismo PH que los sanos y son bien formados y llenos, pero con una porción de este infectada. En muchos casos la incorporación de esos granos a la mezcla eleva la cantidad de toxinas en la harina con valores de DON fuera de tolerancia por el índice de toxicidad.

Además, hay que tener mucho cuidado con la incorporación de los granos enfermos, (separados en la prelimpieza o limpieza), al afrechillo o subproductos del molino ya que pueden elevar el índice de toxicidad de estos, generando trastornos al utilizarlos en raciones para la alimentación animal. La separación de estos granos es bastante dificultosa en las limpiezas con máquinas convencionales. Hay que incorporar "mesas densimétricas" y regularlas muy bien para lograr algún resultado. Existe una máquina para lograr esa separación, es la Sortex de Bühler que separa por color, pero son pocos los molinos que la poseen incorporadas en sus diagramas. Considerando lo mencionado anteriormente, es importante el monitoreo de enfermedades para predecir umbrales de daño críticos y actuar en consecuencia. Particularmente para el caso de *Fusarium*, existen modelos predictivos como el desarrollado por el Ing. Moschini.

Los **carbones** son enfermedades de la espiga que afectan la calidad. Uno de es el **carbón volador** o desnudo causado por *Ustilago tritici*. Se transmite exclusivamente a través de semillas. Destruye la espiga por completo, el raquis queda pelado y se transforma en una masa

verde oscura que se desintegra con facilidad (Astiz Gassó, 2014). El otro es el **carbón hediondo, caries o carbón cubierto** causado por *Tilletia foetida, Tilletia caries* o *Tilletia controversia.* Se transmite por semillas. Durante la cosecha se rasgan los granos infectados y se contaminan los sanos. También queda inóculo en el suelo que afectará a las plántulas. Provoca el defecto punta negra por carbón. El grano reduce su tamaño y se torna más esférico, la cubierta toma una coloración blanquecina y en el interior del grano hay una masa negra y untuosa de esporos. Como la cubierta es frágil, se rompe y contamina al grano de trigo adhiriéndose al cepillo y surco. La molienda de estos granos produce harinas grises con olor a pescado (Seghezzo & Molfese, 2006; Astiz Gassó, 2014). En la actualidad con los sistemas de "limpieza en seco" la posibilidad de su eliminación está dada por el trabajo de las despuntadoras, ya que estas eliminan parte de la epidermis del grano y fundamentalmente el "cepillo" que es el lugar del grano donde se acumula la mayor cantidad de esporas. No obstante, cuando la infestación es importante es aconsejable descartar los lotes.

Manejo post cosecha y almacenamiento

Por último, un buen cuidado postcosecha también será necesario para mantener la calidad. Con relación a esto, lo más importante es el almacenaje con una humedad inferior a 14% en silos (previa desinfección y limpieza del grano) y el secado artificial que se debe realizar con flujos de aire caliente, pero la temperatura del aire nunca debe exceder los 65 ºC y la del grano 50 ºC para no desnaturalizar las proteínas formadoras de gluten (Cuniberti, 2014).

Con excesivo calor las proteínas formadoras de gluten pierden su capacidad de aglutinar, dando un gluten cortado, disgregado. Este gluten llevado a la panificación produce un pan que no leuda, no toma volumen, como si se realizara con harina de otros cereales que no tienen gluten. Por este motivo, los compradores de trigo deciden la compra por contenido de gluten y no por proteína, porque la proteína total no se altera con el calor, pero sí su capacidad formadora de gluten (Cuniberti, 2014).

El almacenamiento debe garantizar granos secos, fríos, sanos y limpios. El aumento de la temperatura y la humedad del grano reducen el tiempo de almacenaje seguro, ya que se acelera la respiración y el grano consume sus sustancias de reserva rápidamente. El aumento de temperatura de los granos produce focos de calor húmedos y puede llegar a temperaturas muy elevadas, causando el ardido de los granos con consecuencias en la calidad del gluten semejantes al secado artificial a altas temperaturas (Cuniberti, 2014).

Para concluir es importante comprender que un **buen pan** se obtiene de un **buen trigo** con **cultivares de buena aptitud** panadera y que la calidad se **genera a través del ciclo** del cultivo y especialmente en el **llenado del grano**. El manejo agronómico es de suma importancia en las decisiones relacionadas a la calidad del cultivo como la fertilización nitrogenada en el momento y dosis óptima para lograr un buen contenido de proteína y gluten. Otro punto de gran interés es conocer la calidad de las variedades de los trigos en cada subregión de cultivo para cubrir las diversas demandas de calidades específicas que se adapten a los distintos usos.

El grano de trigo

El grano de trigo es un cariopse que tiene forma ovalada (Fig. 10.4). Está formado por tres partes principales: el pericarpio o salvado que se ubica en la parte periférica del grano, el germen o embrión ubicado en un extremo y el endosperma que es la parte interna. En el extremo opuesto al embrión se encuentra el cepillo que es un conjunto de pelos finos con sílice. El grano de trigo posee un surco (invaginación de la aleurona) longitudinal. El pericarpio, la testa y la capa de aleurona conforman el salvado. El salvado contiene numerosas vitaminas y minerales. La capa de aleurona se localiza entre el salvado y el endospermo. Tiene una función muy importante en la germinación y posee numerosas sustancias nutritivas (Gómez Pallares *et al*., 2007). El endosperma conforma el 82% del peso del grano. El germen de trigo es rico en vitaminas del grupo B y E, proteínas, grasas y minerales. El endosperma contiene principalmente almidón y proteínas y en menor cantidad celulosas, vitaminas y minerales. Del endosperma se extrae la harina blanca (Gómez Pallares *et al*., 2007).

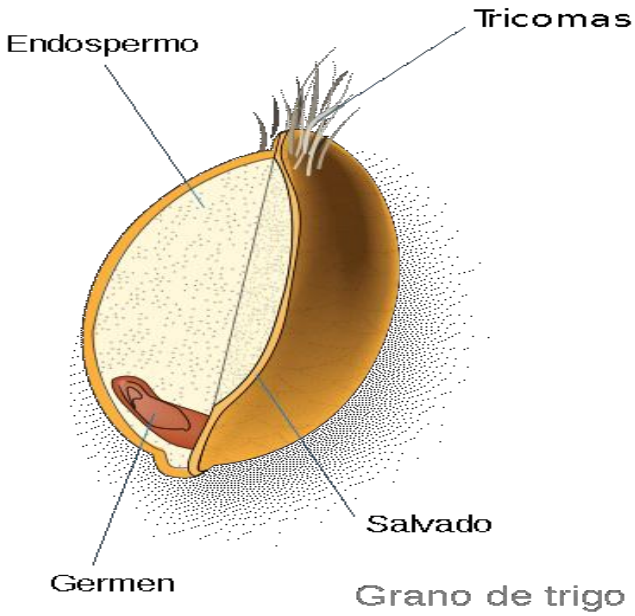


Fig. 10.4.. Estructura del grano de trigo.
Fuente https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wheat-kernel_nutrition-es.svg
https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en

La evaluación de la calidad molinera

La industria molinera es exigente en las características de las harinas que deben ser usadas para la obtención de determinados productos, ya que de ellas depende la calidad final y la mayor aceptación por parte del consumidor. No todas las variedades se pueden adaptar a producir los diferentes productos ni a los diferentes procesos. Una variedad puede ser buena para panificación, pero puede no serlo para galletitas, repostería, pan dulce, pan de molde, etc., productos que requieren otras características en las harinas. En su gran mayoría las industrias utilizan mezclas de variedades, esto implica gran diversidad de comportamientos reológicos.

La importancia en el uso de métodos de determinación patrón y la calibración de los equipos

Los métodos que evalúan la calidad del trigo deben garantizar resultados exactos y confiables. Existen métodos llamados patrón, son seguros y permiten la calibración del resto de los equipos existentes. Las determinaciones deben realizarse por duplicado y ofrecer resultados comparables. Para esto es importante seguir las técnicas tal como lo indican las normas. Para garantizar resultados confiables es muy importante que los equipos con los que se realizan las determinaciones de calidad estén calibrados por instituciones aptas para tal fin. El uso diario de los equipos genera roturas y/o modificaciones que deben ser corregidas. También es importante que cada equipo reciba una calibración diaria en el laboratorio.

La molienda experimental

El grano de trigo antes de ser molido debe ser acondicionado. Este paso es fundamental para lograr una separación eficiente del pericarpio y el germen del grano, del endospermo. Consiste en agregar agua al trigo 24 h antes de la molienda, para que éste alcance una humedad final de 15,5% (IRAM 15854-1). Para obtener una muestra de harina representativa y realizar un análisis de calidad, se utilizan molinos experimentales. Su utilización en semilleros, unidades de investigación, y organismos abocados al estudio, creación y mejoramiento genético de variedades de trigo es de vital importancia para la determinación de la potencialidad de los cultivares en cuanto a su comportamiento en la industria (rendimiento en harinas, características reológicas, ensayos de panificación, etc). Replica en pequeña escala los resultados a obtener a posteriori en escala industrial en el molino industrial propiamente dicho.

El molino Bühler MLU 202 (Fig. 10.5.a) está provisto de un diagrama de tres roturas (cilindros estriados) y tres pasajes por cilindros lisos de reducción y compresión, los que se deben ajustar de acuerdo con reglajes preestablecidos y siguiendo la técnica indicada. Con él se pueden obtener resultados que son de gran utilidad para la toma de decisiones en la conducción del molino en escala industrial. La densidad de estrías y la luz entre cilindros varía en cada par, siendo el primero con más luz y menos estrías, y el tercero posee una densidad de estrías mayor que el segundo y una luz entre los cilindros menor. Los cilindros de rotura fracturan el grano produciendo partículas grandes de salvado y endosperma adherido. Estos fragmentos van pasando por tamices de diferente granulometría y los que no pasan son llevados por una corriente de aire a los otros bancos de rotura en los cuales se continúa la reducción de su tamaño. El segundo par de cilindros raspa los fragmentos de grano de trigo con el fin de separar el endosperma del salvado. Los cilindros de reducción reducen las partículas de sémolas a un tamaño de harina fina. Además, eliminan las últimas partículas de salvado y germen que puedan quedar. Los fragmentos que no logran atravesar los segundos tamices de los tres cilindros de rotura son guiados por el sistema neumático a los cilindros de reducción.

Para aquellos molinos que trabajan con harinas a pedido, mediante recetas de sus clientes, con especificaciones estrictas en cuanto a valores alveográficos y estabilidad farinográfica, el molino Bühler resulta de singular importancia. Con éste se pueden realizar los ensayos de las harinas en pequeña escala a nivel experimental en el laboratorio, antes de encarar la preparación de las mezclas definitivas a escala industrial. Otros molinos de laboratorio no requieren proceso de acondicionamiento y muelen en fracciones de granulometría mayor (Fig. 10.5.b.).

Fig. 10.5.a Molino experimental Bühler MLU 202.b. Molino Brabender Quadrumat Junior. Laboratorio de Cerealicultura. FCAyF-UNLP. Foto propia.

La evaluación de la calidad molinera comprende diversos análisis:

1. Humedad
2. Peso hectolítrico
3. Peso de mil granos
4. Cenizas
5. Dureza y forma del germen
6. Almidón dañado
7. Proteína del grano
8. Gluten húmedo y seco
9. *Zeleny test*
10. *Falling Number*

Determinación de la humedad

Determinar la humedad de una muestra de grano o harina de trigo es esencial ya que es un valor útil para la realización de todos los ensayos y además los análisis se refieren o corrigen a un valor de humedad de 14%, que es el porcentaje de humedad en el estándar de comercialización. Por otro lado, el comprador de materia prima no quiere comprar agua en exceso, la presencia de agua favorece el desarrollo de microorganismos (hongos y bacterias), la humedad del trigo se debe ajustar para realizar la molienda adecuadamente (Gambarotta, 2005).

El método patrón para determinar humedad es por gravimetría, es decir por diferencia de peso húmedo-seco. Existen otros métodos rápidos para determinar humedad, pero su uso depende del grado de precisión deseado. Para determinar el contenido de humedad de una muestra de harina o grano molido, se deben colocar 5 g (+/- 1 g) de muestra en un pesafiltro de vidrio con tapa. Se distribuye homogéneamente de modo que queden 0,3 g/cm^2. El pesafiltro debe tener 5 cm de diámetro y 2 cm de altura (IRAM 15850-1).

Si la muestra es de grano entero, se debe moler con un molinillo para obtener una granulometría adecuada. Los pesos se registran en una balanza analítica. Los valores que se toman son el peso del pesafiltro vacío con su tapa (PV), el peso de la muestra (PM) y el peso de la muestra seca (PS). Una vez colocada la muestra en el pesafiltro y pesada se coloca en la estufa a 130°C durante 1 hora. Transcurrido este tiempo, se retira de la estufa y se coloca en un desecador hasta que logre la temperatura ambiente. El desecador de vidrio debe tener una placa de metal o en su defecto una placa de porcelana gruesa con sílicagel para absorber la humedad. Cuando la muestra bajó su temperatura se pesa (PS). Finalmente se aplica la fórmula: % humedad = (PM-PS) / (PM-PV) × 100.

Peso Hectolítrico

Es el peso de un volumen de 100 l expresado en kg.hl^{-1}. Sirve para graduar la mercadería, estimar el rendimiento molinero, realizar mezclas y aligaciones y cubicaje. Su determinación se

realiza con la balanza Schopper (Fig. 10.6). Esta balanza consta de un recipiente medidor (¼ l), un tubo receptor, un tubo cargador, una cuchilla, un émbolo o extractor de aire, una caja con pesas. El tubo receptor se calza sobre el tubo medidor. La cuchilla se coloca en la parte superior del medidor y arriba de éste el émbolo. Este conjunto debe estar vertical y en una superficie horizontal sin vibraciones para evitar que los granos se alteren en su normal acomodación.

El operador toma el tubo cargador y en forma de cruz, recoge la muestra de trigo (colocada sobre una bandeja) hasta el ras del tubo. Luego la vuelca sobre el tubo receptor a una distancia de 2 cm, velocidad regular y sin exceder 8 segundos. Luego, saca la cuchilla y la vuelve a insertar rápidamente. Extrae el excedente de cereal y registra el peso del trigo (Fig. 10.7). Este valor en g lo busca en una tabla que convierte este valor en $kg.hl^{-1}$. Por ejemplo, un valor de 204 g (en ¼ l) corresponden a un PH de 82,15 $kg.hl^{-1}$ (Resolución SAGPyA 1262/04 Anexo 26, Metodologías). El PH puede disminuir por defectos de los granos tales como grano chuzo, quebrado, verde, helado, calcinado, picado, lavado, presencia de materias extrañas.

Fig. 10.6. Balanza Schopper en la Bolsa de Cereales (CABA).
Foto propia.

Fig. 10.7. Determinación del PH con Balanza Schopper.
Fotos gentileza Molino Cooperativa Sicsa, Saladillo, Pcia Bs As.

Peso de mil granos

El peso de mil granos (PMG) es un fuerte indicador del rendimiento harinero ya que considera el tamaño promedio del grano. A mayor tamaño mayor relación endosperma/salvado y por lo tanto mayor rendimiento potencial harinero. En el PMG influye la heterogeneidad de tamaño, la forma y vitreosidad del grano. Es dependiente del cultivar y el ambiente (Seghezzo & Molfese, 2006). Un valor se considera aceptable entre 30- 32 g y muy aceptable si es mayor a 35 g. Para determinar el PMG se pueden contar los granos manualmente o con un contador electrónico y luego pesar (Fig. 10.8).

Fig. 10.8. Contador electrónico de granos. Laboratorio de Cerealicultura FCAyF- UNLP.
Foto gentileza: Ing. Agr. Eugenia Esquisabel.

Cenizas

La determinación de cenizas es muy significativa para la molinería. Conocer la cantidad de cenizas en la harina permite estimar el rendimiento harinero que se tendrá. El trigo tiene entre 1,3 a 2,4% de cenizas distribuidas mayormente en el pericarpio (6%) y luego en el endosperma interno (0,3%). La presencia de cenizas en la harina imparte una coloración oscura indeseable para los productos panificados. Según el Código Alimentario Argentino (CAA) las harinas deberán tener las siguientes características (Tabla 10.1).

Tabla 10.1: Características de las harinas según el CAA

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

Luego están las harinillas cuya humedad es de 14,5 % y sus cenizas son para harinilla de primera de 1,36 a 2,00 y para harinilla de segunda 2,00 a 3,00%. Se admite una tolerancia del 3% sobre los valores establecidos. La determinación de cenizas se realiza por incineración de la materia orgánica en una mufla (Fig. 10.9A y Fig. 10.9B) a 920° C, en cápsulas de porcelana (Fig. 10.9C). Luego se llevan al desecador y se pesa hasta valor constante (IRAM 15851).

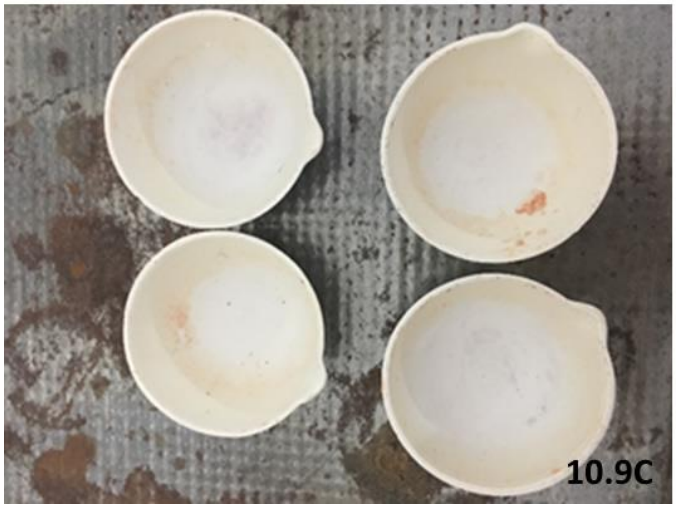


Fig. 10.9A. Mufla y desecador. Fig. 10.9B. Mufla a 920°C. Fig. 10.9C. Cápsulas de porcelana con muestra incinerada. Laboratorio de Cerealicultura FCAyF-UNLP.
Fotos propias.

Características físicas del grano

Dureza del grano y forma del germen

Es una característica genética que depende de la compactación del endosperma y las fuerzas de unión entre la proteína y el almidón. Existe una diferencia entre los trigos duros y los trigos blandos. Los trigos duros requieren mayor tiempo de acondicionamiento con respecto a los trigos blandos. Los trigos duros requieren mayor energía en la molienda, presión de los cilindros. La harina será fácilmente separada del afrecho (Seghezzo & Molfese, 2006). La separación del pericarpio del endosperma debe ser satisfactoria para evitar la presencia de partículas de salvado en la harina. Si la separación es deficiente se observarán pecas en las masas. Con respecto a la presencia del germen, éste oscurece las harinas y provoca rancidez debido a la presencia de lípidos que la oxidan. A mayor tamaño y protuberancia del germen, más fácil separarlo del resto del grano. Esto facilita la molienda.

Almidón dañado

Durante la molienda es habitual que se rompan los gránulos de almidón (entre un 5-9%) (Seghezzo & Molfese, 2006). Un poco de almidón dañado es totalmente necesario y puede favorecer la absorción de agua, pero un exceso causa muchos problemas. El exceso de almidón dañado causa mayor absorción de agua durante el amasado, las masas aumentan su extensibilidad y resultan pegajosas, panes chatos, más oscuros (porque hay azúcares que reaccionan con las proteínas). Los factores que influyen en el almidón dañado son intrínsecos tal como la variedad, la dureza del grano, ya que, a mayor dureza, el grano opone mayor resistencia a la molienda. También depende del proceso mecánico al que fue sometido (número de pasadas, velocidad de alimentación, separación y presión de los cilindros).

Determinación del almidón dañado

Existe un equipo llamado SDmatic que mide el nivel de daño en el almidón de la harina a través de medir el porcentaje de iodo absorbido (Chopin Technologies, 2015). El electrodo genera iodo. Al añadir la harina, el iodo se fija en el almidón (gránulos dañados). Se mide una corriente eléctrica que es proporcional a la cantidad de iodo en solución. A menor intensidad eléctrica, mayor contenido de almidón dañado.

Las proteínas del trigo

Las proteínas del grano de trigo se pueden clasificar en dos grupos: las formadoras de gluten y aquellas que no lo forman. Las primeras se denominan proteínas de almacenamiento o reserva y constituyen alrededor del 75-80 % del total. Entre las proteínas no formadoras de gluten, que representan el 20-25 % del contenido total, se encuentran la mayoría de las enzimas (Gómez Pallarés *et al*., 2007). Con respecto a la calidad panadera, el gluten se correlaciona con la concentración de proteína que determina el valor nutricional.

Las proteínas formadoras de gluten pertenecen a la clase de prolaminas (Shewry *et al*., 1995) y se encuentran en el endosperma del grano de trigo maduro donde forman una matriz continua alrededor de los gránulos de almidón. Estas proteínas son en gran parte insolubles en agua o en soluciones de sales diluidas. Las gluteninas proveen elasticidad y resistencia a la extensión o tenacidad (MacRitchie, 1994, Verbruggen & Delcour 2003), mientras que las gliadinas usualmente confieren viscosidad y extensibilidad a las masas (Ciaffi *et al*., 1996). La elasticidad y extensibilidad son propiedades importantes en la panificación. La determinación del contenido de proteínas se realiza por método Kjeldahl (Sáez-Plaza *et al*., 2013). Así mismo, existen otros métodos que bien calibrados proveen resultados equivalentes.

Para el productor y acopiador, la proteína es importante ya que incide en el precio del grano al formar parte del estándar de comercialización, con bonificaciones y descuentos por encima o por debajo de la base de comercialización del 11 %. En cambio, al molinero le interesa el contenido de gluten más que la proteína y eso se debe a que la proteína puede estar desnaturalizada por un almacenaje inadecuado o por secado del grano a altas temperaturas, haciendo que no formen gluten (Cuniberti, 2001). De allí que el gluten pasó a ser un parámetro clave en la comercialización interna.

Determinación de proteína: método Kjeldahl

El método Kjeldahl fue introducido por el danés Joahn Kjeldahl en 1883. Sirve para determinar el contenido de nitrógeno (N) en materia orgánica (Sáez-Plaza *et al*., 2013). Este método mide indirectamente el contenido de proteína de los alimentos a través de la medición del contenido de N y posterior multiplicación por un factor de conversión (Moore *et al*., 2010). Es el **método considerado patrón** y comprende tres etapas: mineralización de la materia orgánica (granos de trigo), destilación y posterior valoración (Saha *et al*., 2012). En este método, el contenido de N orgánico contenido en las muestras es digerido con ácido sulfúrico a sulfato de amonio en presencia de un catalizador, el amonio es luego liberado en medio básico y finalmente valorado o titulado (Sáez-Plaza *et al*., 2013).

Multiplicando el porcentaje hallado de N por un factor de conversión que en trigo es 5,7 se obtiene el porcentaje de proteína. A pesar de ser un método largo, peligroso y laborioso, sigue siendo el método confiable y preciso que se usa para estandarizar otros métodos. El método Kjeldahl tiene diversas variantes, micro y macro, basadas en el tamaño de la muestra y el equipo. El procedimiento original requiere un equipo grande que necesita una habitación especial del laboratorio y requiere grandes cantidades de reactivos. El método **Micro-Kjeldahl** (Fig. 10.10) es más comúnmente usado y requiere menos mezcla de ácido y catalizador (Greenfield & Southgate, 2003). Se basa en el mismo fundamento que el Kjeldahl, pero a escala menor (Horneck & Miller, 1998).

$$\% \text{ Proteína} = [(\text{Vol HCl} \times 0{,}01 \times 14{,}007) / 10 \times m] \times 5{,}7$$

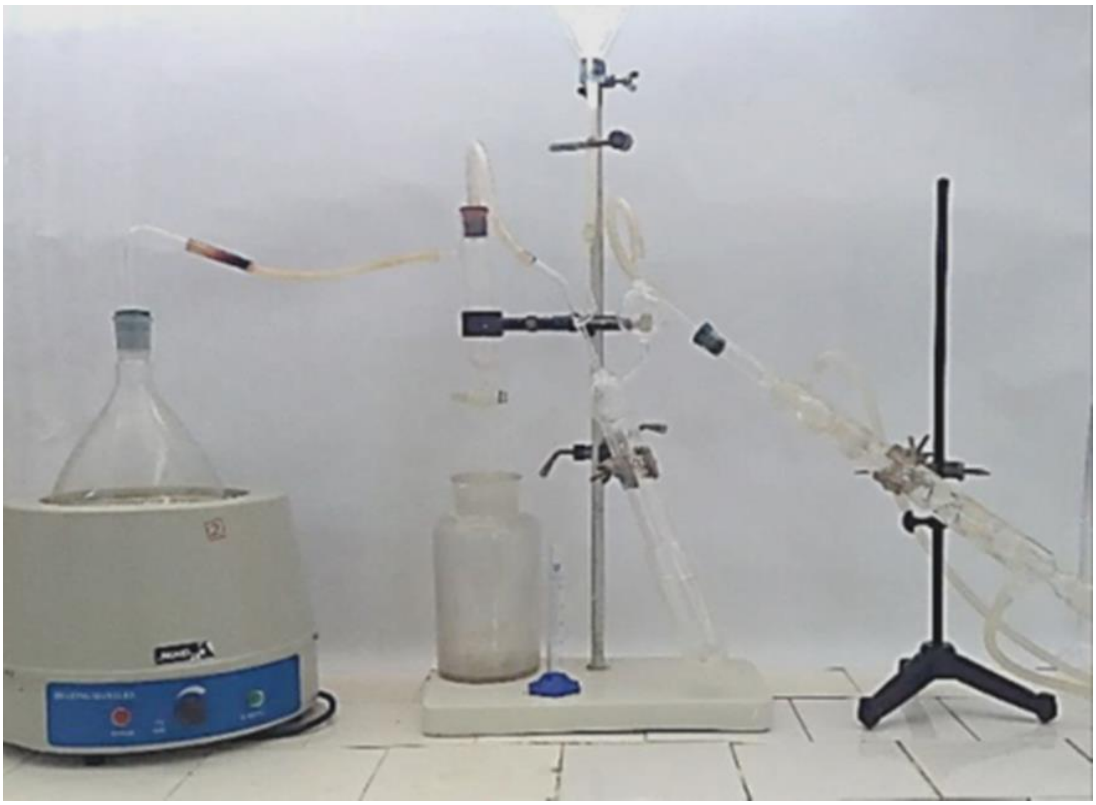


Fig. 10.10. Equipo MicroKjeldahl en Laboratorio de Cerealicultura, FCAyF-UNLP. (Foto Gerard, 2017).

Existen otros equipos que determinan proteína como el NIR (infrarrojo por reflectancia) o NIRT (infrarrojo por transmitancia). Estos equipos realizan determinaciones rápidas, pero es muy importante que estén calibrados con el método patrón.

Determinación del contenido de gluten

El equipo utilizado es el Glutomatic (Fig. 10.11B). Existen dos normas vigentes, en una de ellas se utiliza solución salina (IRAM 15864-2) (exportación) y en otra agua destilada (IRAM 15864-1) (mercado interno). El ensayo se realiza por duplicado. En cada vaso se colocan 10 g de harina (mi) (Fig. 10.11A) y 4,8 ml de agua destilada. El equipo realiza el amasado y lavado en forma automática. Las proteínas solubles en agua y el almidón se lavan depositándose en un vaso (Fig. 10.11E). Una vez obtenido el bollito de gluten húmedo (GH) (Fig. 10.11C), se coloca dentro de los casetes de la centrifuga para retirar el excedente de agua (Fig. 10.11D). Luego, se pesa el GH (m) en balanza analítica y el dato obtenido se multiplica por 10. El dato se refiere a la humedad en base 14%.

GH = m/ mi x 100 × 86,0/ 100 – H

H es el contenido de humedad de la muestra.

Los porcentajes de GH (base 14% de humedad) pueden ser 27 a 32% y mayor para un buen gluten. En ocasiones, la muestra de harina no liga, es decir no forma gluten (Fig. 10.11F). Para determinar el contenido de gluten seco, se colocan los dos bollitos de gluten (uno de cada vaso) en el glutork (Fig. 10.12A), (dos planchas teflonadas a 134° C) y se deja 4 min 30 s (Fig. 10.12B). Por último, se pesa el GS (Fig. 10.12C) y se multiplica por 10. Los porcentajes para GS (base 14% humedad) pueden ser 9 a 12% o superior.

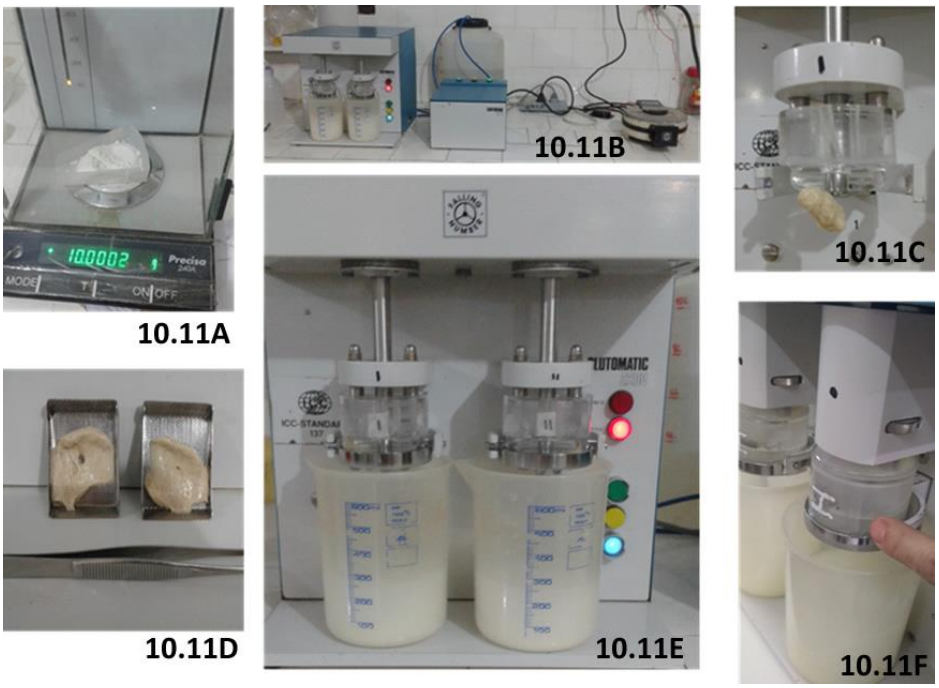


Fig. 10.11A. Balanza analítica con muestra de harina preparada para determinar gluten. Fig. 10.11B. Equipo Glutomatic 2200 con centrífuga y glutork. Fig. 10.11C. Gluten húmedo recién amasado. Fig. 10.11D. Gluten húmedo sacado de centrífuga. Fig. 10.11E. Glutomatic amasando y lavando. Se aprecian los vasos con almidón y proteínas solubles. Fig. 10.11F. Gluten sin ligar.
Fotos gentileza Ing. Agr. Waldo Berrueta. Laboratorio de Cerealicultura, FCAyF- UNLP.

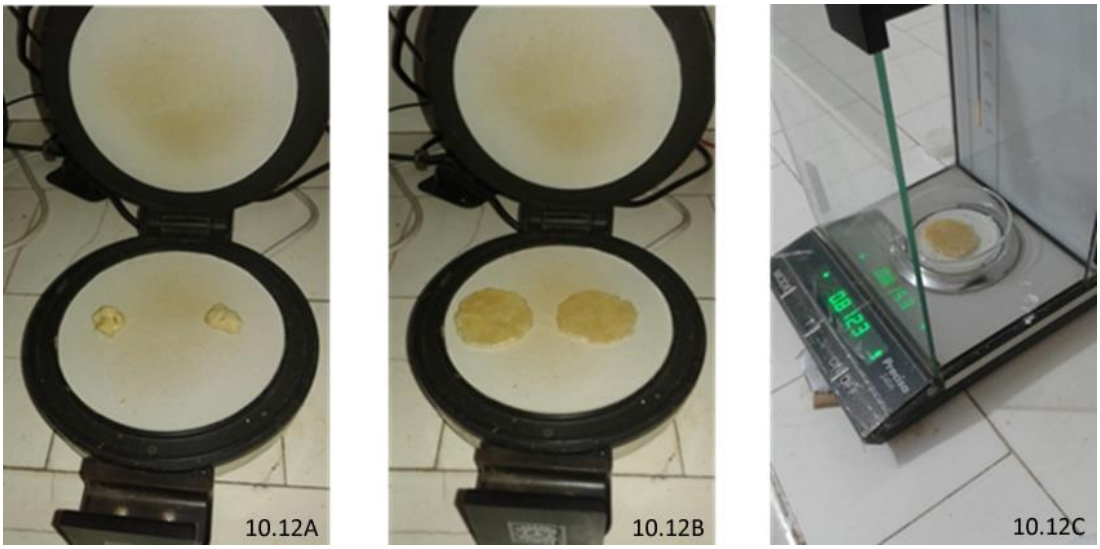


Fig.10.12A y 10.12B. Determinación de gluten seco en Glutork y Fig. 10.12C. Pesada de gluten seco en balanza analítica.
Fotos gentileza Ing. Agr. Waldo Berrueta. Laboratorio de Cerealicultura, FCAyF- UNLP.

Zeleny test

Esta prueba mide la calidad de la proteína de una manera indirecta. En una probeta, se forma una suspensión de harina con azul de bromofenol y se agita vigorosamente (Fig. 10.13A). La suspensión se coloca en un agitador mecánico (Fig. 10.13B) durante 5 minutos. Luego, se le agrega reactivo (ácido láctico, alcohol isopropílico y agua destilada). Se agita 5 minutos adicionales y se deja reposar en posición vertical. Por último, se lee el volumen de sedimentación (IRAM 15875) (Fig. 10.13C). El índice de sedimentación normal se encuentra entre 45 a 50 ml. A mayor volumen de sedimentación indica gluten fuerte por el contrario a menor volumen de sedimentación indica gluten débil (Vázquez, 2009).

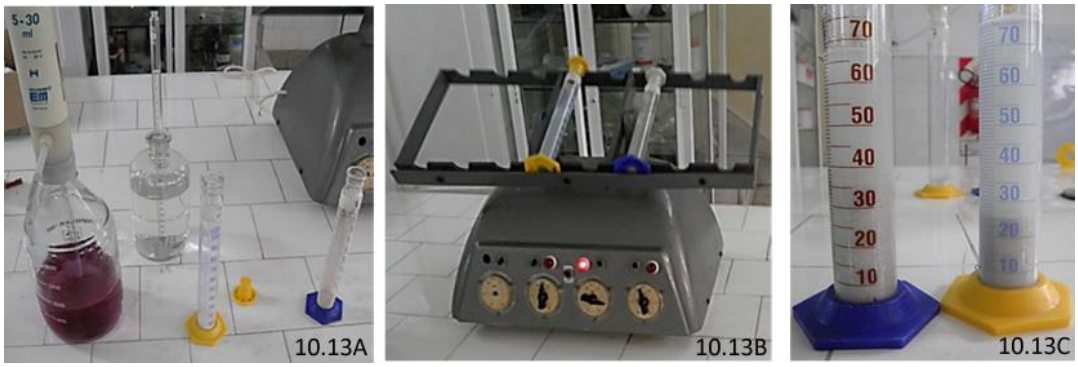


Fig. 10.13A. Muestra de harina y azul de bromofenol. Fig. 10.13B. agitador. Fig. 10.13C. Probetas con volumen de sedimentación.
Fotos (Gerard, 2017). Laboratorio de Cerealicultura, FCAyF-UNLP.

Falling Number o índice de caída

El brotado del trigo afecta negativamente la calidad panadera debido a que la hidrólisis de las moléculas de almidón reduce la viscosidad de la masa, la cual resulta pegajosa y difícil de procesar, produciendo panes poco estructurados al horneo (Chamberlain *et al*., 1981). Una semilla pregerminada presenta una alta actividad de la enzima alfa amilasa, la cual es dependiente del grado de germinación del grano. Las alfa y beta amilasas son enzimas que desdoblan el almidón en azúcar fermentable y maltosa.

Una manera indirecta de medir la actividad de la alfa amilasa, en una muestra de trigo recibida por un molino, es mediante el análisis denominado ***Falling Number*** (FN) (índice o número de caída) medido en segundos (Fig. 10.14A). El método FN o índice de caída se basa en la rápida gelatinización de una suspensión de harina de trigo, introducida en un baño María hirviendo y en la subsiguiente medición del tiempo (en segundos) de la licuefacción del almidón contenido en la muestra por la acción de la alfa amilasa (Vázquez, 2009).

En un tubo viscosímetro de FN (Fig. 10.14B) se colocan 7 g de harina aproximadamente (o lo que indica la tabla en base al % humedad de la muestra calculado previamente) y se agregan 25 ml de agua destilada, agitando enérgicamente 25 a 30 veces, ubicando el tubo en una posición de 45°. Rápidamente, se coloca el vástago dentro del tubo viscosímetro que posee la suspensión y se procede al ensayo. Se efectúa una rápida gelificación y se mide después la fluidificación a través del tiempo que tardó en caer el vástago inmerso en el engrudo (Fig. 10.14C) (IRAM 15862).

Interpretación de los resultados obtenidos en el FN

El total de segundos es el número de caída o FN, el cual está relacionado con la actividad de la enzima alfa amilasa. A mayor actividad enzimática, menor número de caída (indicando la presencia de grano brotado en la muestra). Si el número de caída o FN es menor a 150 s indica presencia de grano brotado. Las masas de estas harinas resultarán pegajosas, flojas, extensibles, difíciles para trabajar en máquinas. Los panes que resulten de estas harinas serán de poco volumen, aplastados, con coloración oscura debido a la reacción de Maillard (reacción química entre azúcares y proteínas), con ampollas en la superficie y miga gomosa. Si el número de caída o FN se encuentra entre 300 a 400 s la actividad alfa amilasa es normal y si el resultado supera los 450 s indica actividad de la alfa amilasa débil y los panes tendrán miga seca, dura, compacta y con corteza pálida.

Fig. 10.14A. Equipo Falling Number. Fig. 10.14B. Tubos viscosímetros de Falling Number. Fig. 10.14C. Tubo viscosímetro con muestra de trigo gelificada luego de realizar el FN.
Fotos gentileza Ing. Agr. Facundo Quiroga. Laboratorio de Cerealicultura, FCAyF-UNLP.

Evaluación de la calidad panadera

Las panificadoras son muy exigentes porque emplean procesos altamente automatizados, debiendo partir de una materia prima con características homogéneas para elaborar distintos productos (Cuniberti, 2005). Para conocer la aptitud industrial se realizan análisis de laboratorio que definen la calidad de un trigo y así se pueden satisfacer las necesidades de los diferentes eslabones de la cadena comercial (Salomón *et al*., 2013).

Reología del trigo

La reología estudia como los materiales se deforman, fluyen o fallan cuando se les aplica una fuerza. El nombre deriva de la palabra griega *rheos* que significa río, fluidez, transmisión. Por lo tanto, la reología se dedica a la "ciencia de lo que fluye" aunque las investigaciones reológicas no sólo estudian líquidos sino también sólidos. Normalmente, para medir una propiedad reológica el material es sometido a una distorsión o tensión precisa cuantificable, controlada, en un tiempo determinado y posteriormente se miden parámetros como tenacidad viscosidad, dureza (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

Las mediciones reológicas en las masas se utilizan para definir sus propiedades físicas. Los objetivos son realizar una descripción cuantitativa de las propiedades mecánicas de los materiales, obtener información relacionada con la estructura molecular y la composición de los materiales, predecir el comportamiento del producto final en el amasado, laminado, horneado (Dobraszczyk, 2003; 2004).

Ensayos reológicos

Alveógrafo de Chopin: determinación del alveograma

El principio del funcionamiento del alveógrafo (Fig. 10.15A) se basa en la extensión tridimensional de una porción de masa que bajo la acción de una presión de aire se infla y toma la forma de una burbuja (Fig. 10.15B). El gráfico resultante se denomina alveograma (Fig. 10.16) y registra la presión en el interior de la burbuja hasta que ésta explota. Esta deformación de la masa simula la producida durante la fermentación bajo la presión del gas de origen biológico o químico. El alveógrafo está diseñado para medir la resistencia a la expansión y la extensibilidad de la masa en el ensayo. El instrumento consta de la amasadora para la formación de la masa, el alveógrafo propiamente dicho y el manómetro registrador de la curva (IRAM 15857).

Fig 10.15A. Alveógrafo de Chopin en Wheat Chemistry and Quality Laboratory CIMMYT. (Foto gentileza Dra. María Constanza Fleitas).

Fig. 10.15B. Formación del alveo o burbuja en Alveógrafo de Chopin. Laboratorio de Cerealicultura, FCAyF-UNLP.

El alveograma se utiliza para estimar la calidad de trigos y harinas destinadas a todos los tipos de panificación, para el control del proceso de molienda, selección de mezclas de trigo para la producción de harinas y verificación de la acción de aditivos autorizados en el comportamiento de la harina.

Los parámetros que se evalúan en un alveograma (Fig. 10.16) son:

Valor P: Tenacidad (variable de presión máxima): Indica la resistencia de la masa a ser estirada y es representada por la altura máxima de la curva del alveograma. Se mide en mm.

Valor L: Extensibilidad (promedio de las abscisas): Es la distancia desde que se inicia el inflado y se origina la curva hasta que se rompe la burbuja o alvéolo. Se mide en mm.

Valor P/L: es la relación existente entre la tenacidad (P) y la extensibilidad (L). Indica la conformación de la curva y cuan equilibrada es.

Valor W: es la fuerza panadera e indica el trabajo necesario para la deformación de la masa y se representa con el área bajo la curva del alveograma. Se mide en Joules × 10^{-4}.

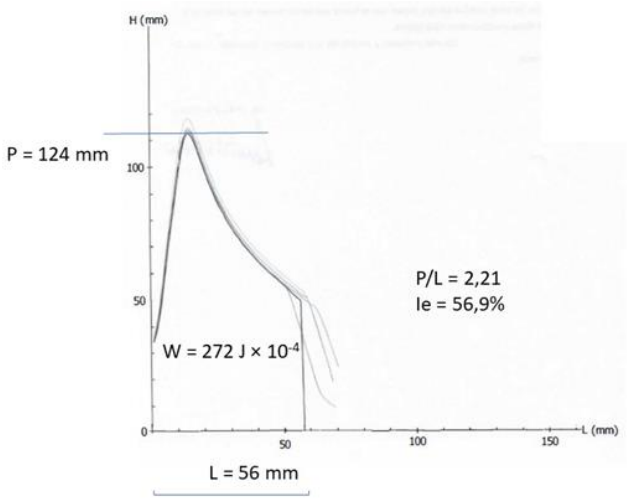


Fig. 10.16. Alveograma

Otros parámetros son el índice de elasticidad (Ie) %, índice de hinchamiento (G) que indica la aptitud para hacer un pan y la relación P/G.

El farinógrafo de Brabender

El farinógrafo de Brabender (Fig.10.17 y Fig. 10.18) mide y registra la consistencia de una masa que se forma a partir de harina y agua, cómo se desarrolla y cómo se va modificando con el transcurso del tiempo. El gráfico resultante se llama farinograma (Fig. 10.19 y Fig. 10.20), éste muestra la resistencia que opone la masa a un trabajo mecánico continuo en función del tiempo, en condiciones constantes de ensayo. El farinograma permite extraer conclusiones acerca de la **aptitud industrial de una harina** (IRAM 15855).

Fig. 10.17. Farinógrafo de Brabender.
Laboratorio de Cerealicultura (FCAyF-UNLP).

Fig. 10.18. Farinógrafo de Brabender (Wheat Chemistry and Quality Laboratory CIMMYT. Foto gentileza Dra. María Constanza Fleitas).

Parámetros del farinograma

Absorción de agua (A): Se mide en ml directamente desde la bureta del equipo y es el volumen necesario para obtener en el farinógrafo, una masa con una consistencia máxima de 500 UB (Unidades Brabender). Cuanto mayor sea la cantidad de agua absorbida para alcanzar las 500 UB, mayor será el rendimiento de la masa y por lo tanto el volumen de pan. Los valores aceptables se encuentran entre los 58 y 60 ml.

Tiempo de desarrollo de la masa (B): Se mide en minutos y es el tiempo (min) transcurrido entre el instante que comienza el agregado de agua y el instante en el que se alcanza la consistencia máxima de la masa. Un desarrollo rápido de la masa, indica un menor tiempo de trabajo de amasado. Valores aceptables se encuentran entre 5 y 10 min.

Estabilidad de la masa (D): Se mide en minutos. Es el tiempo que la masa permanece en las 500 UB. Cuanta más ancha sea la curva, más elasticidad y extensibilidad tendrá la masa y mayor la posibilidad de obtener una panificación de mayor volumen. A su vez, cuanto mayor sea la estabilidad, tanto más larga será la fermentación y tanto mayor será el esfuerzo que podrá soportar (Fig. 10.19).

Tiempo de ablandamiento (E): Es la diferencia entre el centro de la curva en el punto en el que comienza la declinación y el centro de la curva 12 minutos después de éste. Se mide en UF (Unidades farinográficas) o UB (Unidades Brabender). Cuanto mayor sea el grado de aflojamiento más corta tendrá que ser la fermentación y el esfuerzo al que la masa podrá ser sometida. En la Fig. 10.20 se muestra un farinograma de una harina muy floja o poco estable con alto grado de aflojamiento. Con respecto a los valores reológicos aceptables, es fundamental tener presente

que existen muchísimas especificaciones relacionadas con el tipo de producto a elaborar. Por ejemplo, la industria de galletitas prefiere masas extensibles (L alto) y la industria fideera masas tenaces (P elevado). La estabilidad farinográfica depende del destino final de la harina.

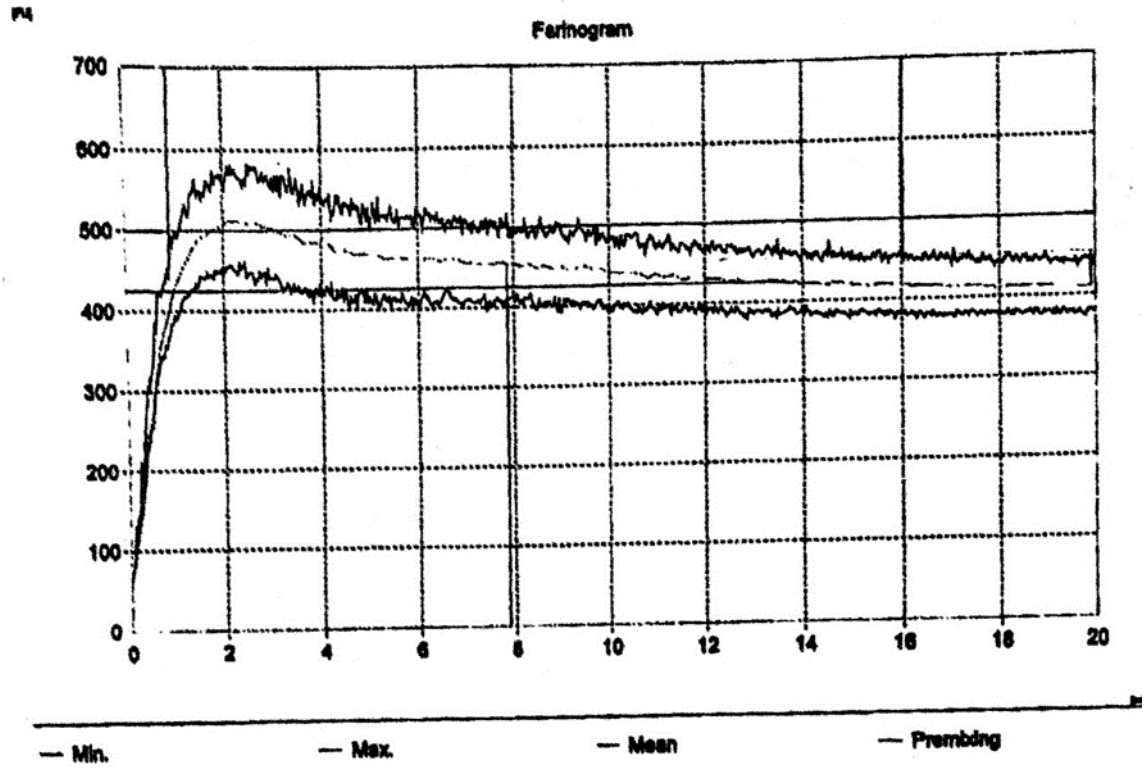


Fig. 10.19. Farinograma de una harina estable con sus parámetros calculados: Absorción farinográfica (corregida para 500 UF) 58,9%, B (tiempo de desarrollo) 7,9 min, D (Estabilidad farinográfica) 15,1 min, E (tiempo de aflojamiento (10 min después del inicio) 13 UF, Tiempo de aflojamiento (ICC/ 12 min después del pico máx) 43 UF.
Gentileza Molino Campodónico (La Plata).

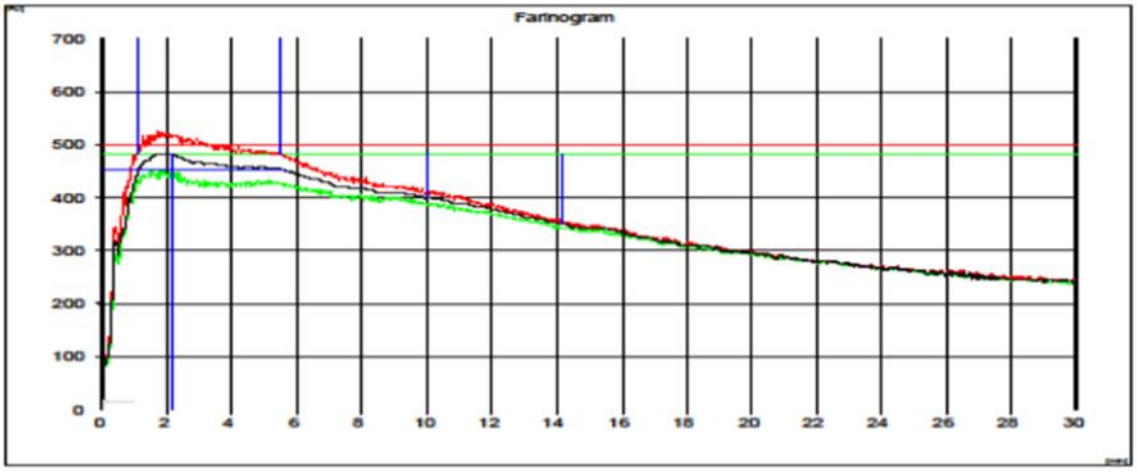


Fig. 10.20. Farinograma de una harina muy floja con sus parámetros calculados: Absorción farinográfica (corregida para 500 UF) 59,5%, B (tiempo de desarrollo) 2,2 min, D (Estabilidad farinográfica) 4,4 min, E (tiempo de aflojamiento (10 min después del inicio) 82 UF, Tiempo de aflojamiento (ICC/ 12 min después del pico máx) 131 UF.

Panificación

La panificación es un proceso crucial para determinar las características fehacientes de la harina y su resultado final: el pan. Permite comprobar la aptitud industrial y ratificar los análisis realizados con anterioridad. El pan es el producto perecedero resultante de la cocción de una masa obtenida por la mezcla de harina de trigo, sal comestible y agua potable, fermentada por especies propias de la fermentación panaria, como la levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*). El agua permite el amasado, hidratando la harina y junto al trabajo mecánico facilita la formación del gluten. Además, permite el desarrollo de las levaduras. La sal cumple diversas funciones da sabor al pan, tenacidad, regula la fermentación, da coloración a la corteza y aumenta la retención de agua en el pan (Calvel, 1983; 1994). Las levaduras fermentan y producen etanol y dióxido de carbono. El dióxido de carbono queda atrapado en la masa, la cual se esponja y levanta.

Panificación experimental

Consiste en un ensayo llevado a cabo en laboratorio bajo normas. Siguiendo la norma IRAM 15858-1 se identifican tres etapas:

Amasado

Tiene como función principal formar una estructura característica de la fase proteica que no está presente en la harina. Este proceso permite el desarrollo de la masa (Fig. 10.21A y Fig. 10.21B). La masa se forma con harina (100 g), agua, levadura (3 g), sal (2,5 g) y azúcar (1 g). La cantidad de agua a agregar y el tiempo de amasado están en función del W, del P/L y del % de proteínas presente en la harina.

Fermentación

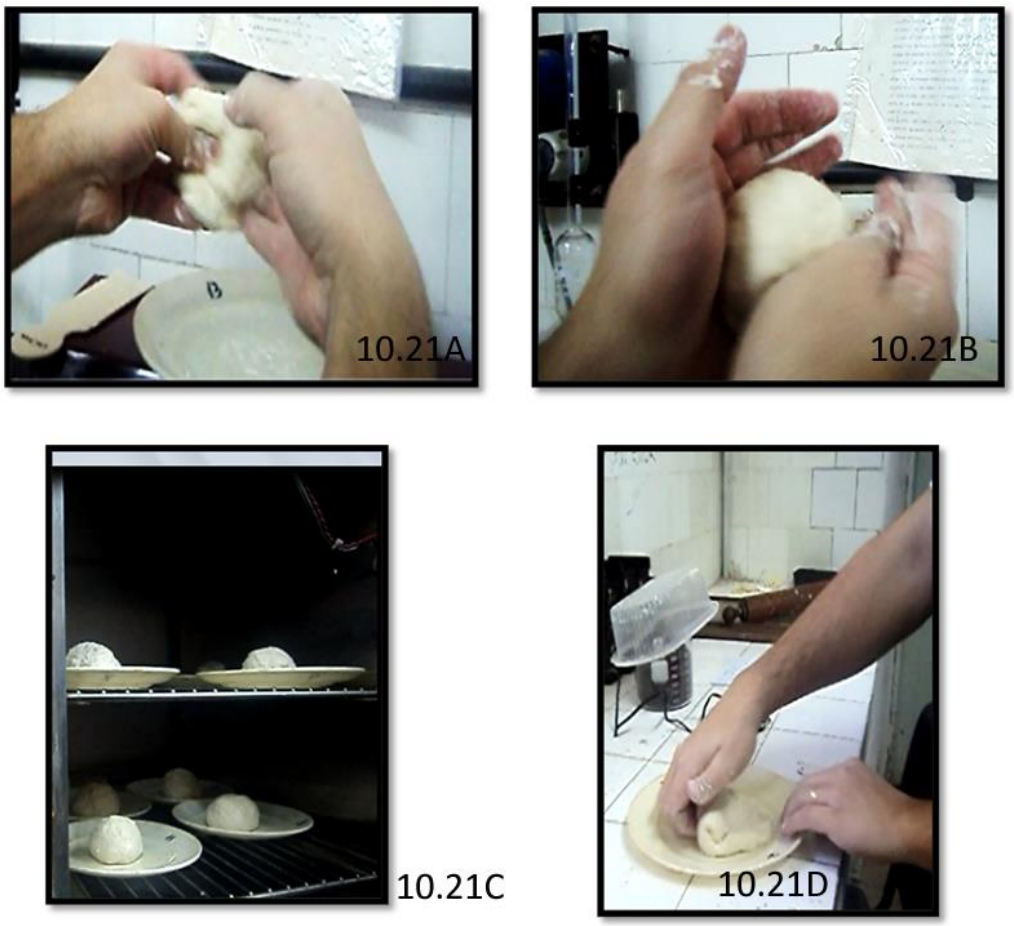
Es el proceso por el cual los azúcares existentes y los gránulos de almidón dañados son transformados por acción de las enzimas en dióxido de carbono y alcohol. Las enzimas que forman parte de la fermentación de la masa son las que actúan sobre los hidratos de carbono. Durante esta etapa se forman en la masa pequeñas burbujas de dióxido de carbono, que hacen que esta vaya aumentando su volumen. Esto se conoce como maduración de la masa. Una masa está madura cuando se ha logrado la máxima elasticidad posible. En ese momento está lista para la cocción.

En la norma se establece un tiempo de pre-fermentación de 85 min en una fermentadora que garantice 80% humedad y una temperatura de 30° C (Fig. 10.21C). A los 45 min se realiza

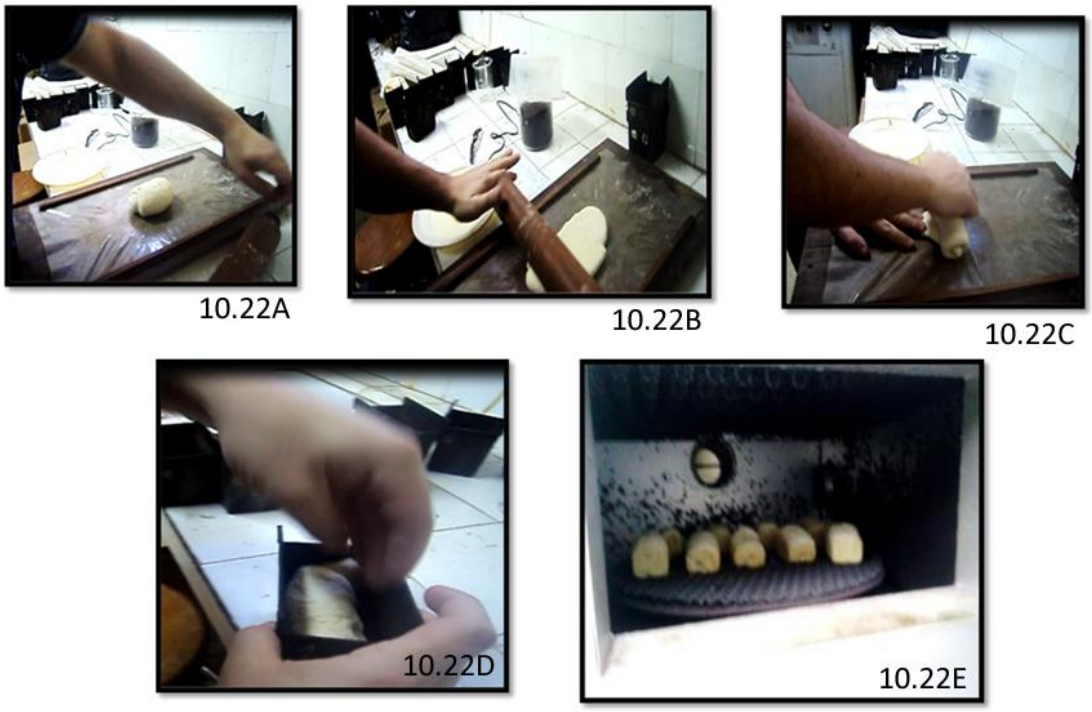
un primer *punch*, (Fig. 10.21D) esto consiste en dar un amasado suave permitiendo a la masa desalojar el dióxido de carbono y a los 15 minutos del primer *punch*, se realiza el segundo. A los 20 min posteriores se realiza el armado del pan, sobre una tabla estandarizada para tal fin (Fig. 10.22A). Las masas son colocadas en moldes estandarizados (Fig. 10.22B).

Cocción

En esta etapa ocurren cambios que transforman la masa en pan. En un principio, el aumento de temperatura provoca que la levadura actúe con mayor intensidad y ocurre el "crecido" en el horno. Por encima de 42°C la levadura se inactiva y la pieza alcanza su volumen final. El aumento de temperatura produce la gelificación del almidón sobre el que actúa la amilasa produciendo dextrina, hasta los 76°C en que se inactiva la enzima. A los 50°C comienza la desnaturalización y coagulación del gluten que continúan cada vez con mayor rapidez hasta los 80°C. La rápida evaporación del agua en la parte superficial provoca la formación de la costra cuyo brillo y color dependerá de las dextrinas formadas. En la panificación experimental los panes son llevados al horno y permanecen 15 minutos en el molde y 15 minutos fuera de él (Fig. 10.22C).



Figs. 10.21A y 10.21B. Amasado. Fig. 10.21C. Pre-fermentación. Fig. 10.21D. Primer punch. Laboratorio de Cerealicultura, FCAyF-UNLP. Foto propia.



Figs. 10.22A-10.22B-10.22C. Armado del pan. 10.22D. Colocación del pan en el molde. 10.22E. Cocción en el horno. Laboratorio de Cerealicultura, FCAyF-UNLP.
Foto propia.

Los sistemas de panificación utilizados en los molinos pueden ser diversos (directo, semidirecto, fermentación larga o tabla). En todos los casos será importante mantener uniformidad en la técnica.

Medición del volumen del pan

Una vez retirado del horno, los panes se dejan a temperatura ambiente (Fig. 10.23) y transcurrido una hora se pesan y se determina su volumen. El volumen puede determinarse con un equipo para tal fin por desplazamiento de semillas de colza (Fig. 10.24A). Otra opción para medir el volumen del pan es con una probeta o vaso de precipitado con semillas de colza (Fig. 10.24B). Es importante repetir la evaluación para obtener un dato promedio. Además, se evalúan color de la corteza, simetría, color de la miga, porosidad, distribución de alvéolos.

Fig. 10.23. Panes a temperatura ambiente (Wheat Chemistry and Quality Laboratory CIMMYT. Foto gentileza Dra. María Constanza Fleitas).

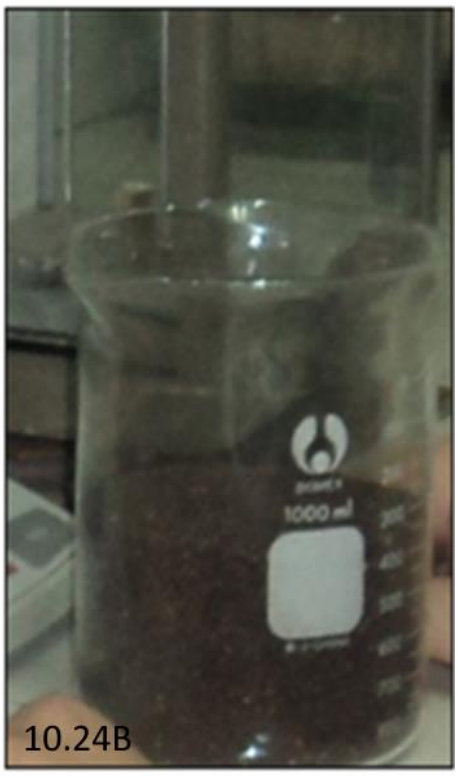


Fig. 10.24A. Equipo para medir el volumen del pan en Wheat Chemistry and Quality Laboratory CIMMYT. (Foto gentileza Dra. María Constanza Fleitas). Fig. 10.24B. Vaso de precipitado con semillas de colza. Laboratorio de Cerealicultura, FCAyF-UNLP.

Referencias

Álvarez Prado, S., Gallardo, J.M., Serrago, R.A., Kruk, B.C & Miralles, D.J. (2013). Comparative behavior of wheat and barley associated with field release and grain weight determination. *Field Crops Research, 144*, 28-33.

Alzueta, I., Miralles, D, Rozzo Ortega, G & Rondanini, D. (2017). Determinación y manejo de la calidad en el cultivo de trigo En M. Sobré, E. Satorre & M. Suárez (Eds.), *Trigo, su rol en los sistemas de producción agrícola* (19-26). CABA: AACREA.

Astiz Gassó, M. (2014). Carbones del trigo. En C.A. Cordo & M.N. Sisterna (Eds.), *Enfermedades del trigo. Avances científicos en la Argentina (*91-102). La Plata: Edulp.

Bartosik, R., Castellari, C., Cardoso, L., de la Torre, D., Abadía, B., Carpaneto, B & Valle, F. M. (2012). Manejo de trigo con fusariosis en la poscosecha. Balcarce, INTA. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_manejo_de_trigo_con_fusarium_en_la_poscosecha.pdf

Brach, A. M. (2012). Factores que determinan la variación de la calidad panadera en trigo. INTA Reconquista. *Revista Voces y Ecos*, *28*, 26-29.

Brocklehurst, P.A. (1977). Factors controlling grain weight in wheat. *Nature*, *266*, 348–349.

Calderini, D.F., Abeledo, L.G & Slafer, G.A. (2000). Physiological maturity in wheat based on kernel water and dry matter. *Agronomy Journal, 92*, 895-901.

Calvel, R. (1983). *La panadería moderna*. Buenos Aires: AméricaLee.

Calvel, R. (1994). *El sabor del pan*. Barcelona: Montagud.

Castro, A.C. (2016). *Efecto de la tolerancia a Zymoseptoria tritici, la fertilización nitrogenada y distintos fungicidas sobre la expresión del rendimiento y la calidad panadera del trigo*. Tesis doctoral. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/53350

Castro, A.C. & Simón, M.R. (2017). The impact of Septoria tritici blotch in bread making quality among argentinean wheat cultivars. *Journal of Cereal Science, 77*, 259-265.

Chamberlain Collins, T. & McDermott, E. (1981). Alpha-amylase and bread properties. *International Journal of Food Science Technology, 16*, 127–152.

Chopin Technologies (2015). Recuperado de https://chopin.fr/files/base_documentaire/leaflet/SDMATIC_leaflet_ES_20150805.pdf

Ciaffi, M., Tozzi, L & Lafiandra, D. (1996). Relationship between flour protein composition determined by size-exclusion high-performance liquid chromatography and dough rheological parameters. *Cereal Chemistry, 73*, 346-351.

Código Alimentario Argentino. Capítulo IX. Alimentos Farináceos. Art 661. Res 167, 26.1.82.

Cuniberti, M. (1996). Fertilización nitrogenada, proteínas y calidad del trigo. Información para extensión Nº 33. INTA Marcos Juárez. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-proteinas-del-trigo.pdf.

Cuniberti, M. (2001). Factores que inciden en la calidad. Información Técnica INTA Rafaela. Publicación Miscelánea, *4*, 1-6.

Cuniberti, M. (2005). Clasificación del trigo como valor agregado. 1ª Jornada de Trigo de la Región Centro. 45-50. Córdoba.

Cuniberti, M. (2014). Almacenamiento de granos (silo bolsa) y calidad. INTA Marcos Juarez. Recuperado de https://inta.gob.ar/documentos/almacenamiento-de-granos-silo-bolsa-y-calidad-trigo

Dimmock, J.P.R.E & Gooding, M.J. (2002). The influence of foliar diseases, and their control by fungicides, on the protein concentration in wheat grain: a review. *Journal of Agricultural Science, 138*, 349-366.

Dobraszczyk, B.J. (2003). Measuring the rheological properties of dough. En S.P Cauvain (Ed.), *Breadmaking Improving Quality,* (375-400). Cambridge, UK: Woodhead Publishing.

Dobraszczyk, B.J. (2004). The physics of baking: rheological and polymer molecular structure function relationships in breadmaking. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 124*(1-3), 61-69.

Dobraszczyk, B.J & Morgenstern, M.P. (2003). Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science, 38*, 229-245.

Gambarrota, L. (2005). *Caracterización de las fracciones de harina de trigo pan. Análisis de las propiedades físico– químicas y reológicas de las fracciones de harina de trigo pan obtenidas en el molino experimental BÜHLER MLU-202*. Tesis de grado. Recuperado de http://repositorio.ub.edu.ar/handle/123456789/114

Gerard, G.S. (2017). *Identificación de genes de resistencia a mancha de la hoja y otros caracteres de importancia agronómica en trigo*. Tesis doctoral. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/60151

Gómez Pallarés, M., León, A.E & Rosell, C. (2007). Trigo En A.E. del León & C. Rosell (Eds.), *De tales harinas, tales panes: granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica*. (19-71). Córdoba, Argentina: Hugo Báez Editor.

Greenfield, H & Southgate, D.A.T. (2003). Food composition data 2nd ed: production, management and use. Roma: FAO of the United Nations.

Horneck, D.A & Miller, R.O. (1998). Determination of total nitrogen in plant tissue. En Kalra, Y.P (Ed.), *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis.* Boca Raton, FL: CRC Press, Soil and Plant Science Council.

IRAM 15850-1. Cereales y productos de cereales. Determinación del contenido de humedad. Parte 1 - Método de referencia práctico.

IRAM 15854-1. Trigo. Molienda experimental para trigo pan. Parte 1 - Preparación y acondicionamiento de la muestra.

IRAM 18851. Cereales y productos de cereales. Determinación de cenizas por incineración.

IRAM 15862. Determinación de Falling Number. Método de Harberg - Perten - AACC N° 56-81.

IRAM 15864-1. Trigo y harina de trigo. Determinación de gluten húmedo, de gluten seco y de índice de gluten. Método de lavado automático. Parte 1 - Lavado con agua para análisis.

IRAM 15864-2. Trigo y harina de trigo. Determinación de gluten húmedo, de gluten seco y de índice de gluten. Método de lavado automático. Parte 2 - Lavado con solución salina.

IRAM 15875. Trigo. Determinación del índice de sedimentación. Ensayo Zeleny.

IRAM 15857. Cereales. Harina de trigo (*Triticum aestivum* L.). Características físicas de las masas. Determinación de las propiedades reológicas mediante el uso de un alveógrafo.

IRAM 15855. Harina de trigo. Características físicas de las masas. Determinación de la absorción de agua y de las propiedades reológicas, utilizando un farinógrafo.

IRAM 15858-1 Panificación experimental. Cereales. Ensayo de panificación. Parte 1 - Método tradicional para la calidad del pan.

MacRitchie, F. (1994). Role of polymeric proteins in flour functionality. En S. Martino al Cimino (Ed.), *Wheat Kernel Proteins: Molecular and Functional Aspects*. (145-150). Universita Degli Studi Delia Tuscia, Consiglio Nazionale della Richerche, Viterbo, Italia.

McCabe, T., Mulhare, J.J., Byrne, J.J., McIvor, A & Gallagher, E.J. (2001). Yield and quality improvement with strobilurin fungicides in winter wheat. *Aspects of Applied Biology and Wheat Quality, 64*, 219–226.

Miralles, D. J., González, F. G., Abeledo, L. G., Serrago, R. A., Alzueta, I., García, G. A., de san Caledonio, R. P & Lo Valvo, P. (2014). *Manual de trigo y cebada para el cono Sur: procesos fisiológicos y bases de manejo.* Buenos Aires: Orientación gráfica editora 1era ed.

Möckel, F.E & Canatmutto, M.A. (1984). Endosperma no vítreo en trigo: una revisión bibliográfica. *Revista Facultad de Agronomía*, *5*, 23-39.

Moore, J. C., de Vries, W., Lipp, M., Grifiths, J. C & Abernethy, D. R. (2010). Total protein methods and their potential utility to reduce the risk of food protein adulteration. *Comprehensive Review Food Science Food Safety, 9*, 330–351.

Peña, R. J. (2007). Current and future trends of wheat quality needs. En H.T. Buck, Nisi, J.E & N. Salomón (Eds.), *Wheat Production in Stressed Environments* (411–424). Dordrecth, Países Bajos, Springer.

Phillips, D. P. & Nierenberger, F. F. (1976). Milling and baking qualities of yellow Berry and dark, hard and vitreous wheats. *The Bakers digest, 50*, 42-48.

PRONACATRI, (2006). Calidad industrial del trigo argentino: Análisis de la Red de Ensayos Comparativos de Trigo (RET), comparación de subregiones y variedades comerciales en cultivo. Programa Nacional de Calidad de Trigo, SAGPyA, Bs. As., 34 pp.

Resolución SAGPyA 1262/04. Anexo 26 Metodologías varias. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/norma26-metodologias-varias.pdf

Sáez-Plaza, P., Navas, M.J. Wybraniec, S., Michałowski, T & García Asuero, A. (2013). An Overview of the Kjeldahl method of nitrogen determination. Part II. Sample Preparation, Working Scale, Instrumental Finish, and Quality Control. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, *43*, 224–272.

Saha, U. K., Sonon, L & Kissel, D. E. (2012). Comparison of conductimetric and colorimetric methods with distillation-titration method of analyzing ammonium-nitrogen in total Kjeldahl digests. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 43*, 2323–2341.

Salomón, N., Aldalur, B., Cuniberti, M & Miranda, R. (2013). Distribución de la calidad del trigo pan argentino utilizando mapas del sistema e información geográfica. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, *39*, 41-50.

Savin, R. & Sorlino, D.M. (2003). Calidad de los granos y estimadores más comunes. En E.H Satorre *et al*. (Eds.), *Producción de granos: bases funcionales para su manejo* (27-45). Buenos Aires: FAUBA.

Schierenbeck, M., Fleitas, M.C., Cortese, F., Golik, S.I. & Simón, M.R. (2019). Nitrogen accumulation in grains, remobilization and post-anthesis uptake under tan spot and leaf rust infections on wheat. *Field Crop Research, 235*, 27-37.

Seghezzo, M.L & Molfese, E.R. (2006). *Calidad en trigo pan*. Boletín técnico 41. Chacra Experimental Integrada Barrow: INTA.

Shewry, P.R., Napie, J.A & Tatham, A.S. (1995). Seed storage proteins: Structures and biosynthesis. *The Plant Cell*, *7*, 945-956.

Stone, P.J & Savin, R. (1999). Grain quality and its physiological determinants. En E.H Satorre & G.A Slafer (Eds.), *Wheat: Ecology and Physiology of yield determination*. (85-120). New York, USA, Food Product Press.

Torrens Baudrix, L & Ventimiglia, L. (2020). Blend de variedades: buscando el equilibrio entre rendimiento y calidad, campaña 2019/20 en 9 de Julio. INTA. AER 9 de Julio EEA Pergamino. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_9_de_julio_blend_variedades_de_trigo_camp._19-20.pdf

Vázquez, D. (2009). *Aptitud industrial de trigo*. Serie Técnica 177, Montevideo, Uruguay: INIA.

Verbruggen, I.M & Delcour, J.A. (2003). Extension properties of wheat flour dough fortified with characterized wheat gluten fractions. *Journal of Cereal Science, 37*,151-156.

Whitney, K. (2018). Fate of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-b-d-glucopyranoside during wheat processing. 4th ICC Latin American Cereals Conference -LACC4- and International Gluten Wheat Seminary -IGW-, 68. 11–14 March, Mexico City, Mexico.