

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

***Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos***

***“Efectos de las condiciones de extrusión en las  
propiedades fisicoquímicas y funcionales de productos  
extrudidos de sorgo integral de bajo contenido de taninos”***

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

***Autor: Lic. Emilce E. Llopart***

***Director: Dra. Silvina R. Drago***

***Codirector: Ing. Rolando J. González***

***Año de presentación: 2011***

## ***Agradecimientos***

Me siento profundamente agradecida, ya que la presente Tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron muchas personas leyendo, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos no tan buenos y en los de felicidad, sin ellos esto no sería posible... *GRACIAS*.

A mis padres y a Lucas, que me acompañaron en esta aventura que significó la maestría y que, de forma incondicional entendieron mis ausencias y malos momentos, pero que siempre me alentaron y ayudaron con amor.

A mi hermano querido que siempre está, y a mi atesorado sobrino "Alejandro" que da luz a nuestras vidas.

A la memoria de mis amados abuelos, La Elvi, Luisa y Alejandro.

A mi Directora Silvina Drago, y a mi Co-director Rolando González, por haber confiado en mi y luego enseñarme, acompañarme profesional y humanamente en cada paso dado, permitiéndome trabajar con absoluta libertad.

A Mario, Roberto, Adriana, Quique, Hugo, Carlitos y Marisa, quienes generosamente compartieron todos sus conocimientos y experiencias, colaborando muy profesionalmente y haciendo grata cada jornada con buen humor.

Gracias también a mis compañeros de trabajo Gime, Mica, Raúl y Sole, que me abrieron las puertas del laboratorio y de sus vidas cada vez que se preocuparon por "donde me iba a quedar".

A unas personas especiales que me atrevo a llamar amigos, que me aconsejaron y estuvieron presentes de muchas formas, Nora, Adri y William.

A la Universidad del Centro Educativo Latino Americano, por haberme formado profesionalmente y a Enrique Torres y Daniel Coria por haberme permitido realizar este Magíster.

A la Facultad de Ingeniería Química y particularmente al Instituto de Tecnología de Alimentos por haberme permitido superar mi formación, a través de la realización del Magíster en Ciencia y Tecnologías de Alimentos.

*Dedicada a las personas  
que me levantaron los brazos  
todas las veces que me sentía vencida.*

## Índice

<b>Resumen</b> .....	I
<b>1. Introducción</b> .....	1
1.1. Aspectos generales de la sociedad de consumo.....	1
1.2. Grano entero.....	3
1.3. Alimentos funcionales.....	5
1.4. Enfermedad celíaca.....	6
1.5. El grano de Sorgo.....	10
1.5.1. Situación actual.....	10
1.5.2. Generalidades, composición y características.....	12
1.5.3. Utilización del Sorgo.....	18
1.6. El Almidón.....	20
1.7. El proceso de extrusión.....	25
1.7.1. Generalidades.....	25
1.7.2. Factores que afectan el proceso de extrusión.....	29
1.7.2.1. Parámetros de operación del extrusor monotornillo.....	31
1.7.2.2. Propiedades de la alimentación.....	32
1.7.3. Extrusión de cereales.....	33
1.7.4. Transformaciones del material durante la extrusión.....	35
1.7.5. Métodos de evaluación del material extrudido.....	37
1.7.6. Métodos de evaluación de las harinas precocidas.....	38
<b>2. Objetivo General</b> .....	40
2.1. Objetivos Específicos.....	41

<b>3. Materiales y Métodos</b> .....	42
3.1. Materias primas.....	42
3.1.1. Determinación de la composición centesimal de la materia prima.....	42
3.1.2. Método para clasificar sorgos según el contenido de taninos condensados .....	42
3.1.3. Diagrama de Molienda de los granos de sorgo.....	43
3.2. Extrusión.....	44
3.2.1. Diseño experimental.....	44
3.2.2. Ensayos de extrusión.....	45
3.2.3. Determinación del Consumo específico de energía mecánica.....	46
3.3. Evaluación de las muestras extrudidas.....	46
3.3.1. Evaluaciones fisicoquímicas de productos extrudidos.....	46
3.3.1.1. Índice de expansión.....	47
3.3.1.2. Volumen específico.....	47
3.3.1.3. Evaluación de la dureza sensorial.....	47
3.3.1.4. Dureza mecánica.....	47
3.3.2. Evaluaciones fisicoquímicas de las harinas precocidas.....	48
3.3.2.1. Solubilidad en agua.....	48
3.3.2.2. Absorción de agua.....	48
3.3.2.3. Respuesta Amilográfica.....	49
3.3.2.4. Grado de gelatinización.....	49
3.3.2.5. Observación microscópica.....	50
3.3.2.6. Determinación del contenido de taninos.....	50

3.3.2.7. Determinación del contenido de fitatos .....	50
3.3.2.8. Determinación del contenido de polifenoles .....	50
3.3.2.9. Determinación de la capacidad antioxidante.....	51
3.3.3. Evaluaciones nutricionales de las harinas integrales.....	51
3.3.3.1. Análisis de la composición centesimal.....	51
3.3.3.2. Determinación del contenido de Lisina disponible.....	52
3.3.3.3. Estudio del contenido de minerales.....	53
3.3.3.4. Disponibilidad de minerales.....	53
3.3.3.5. Digestibilidad proteica.....	53
3.4. Análisis estadístico de los resultados.....	54
<b>4. Resultados y Discusión.....</b>	<b>55</b>
4.1. Efectos de las variables de extrusión sobre las características físicoquímicas y texturales de los productos expandidos.....	55
4.1.1. Consumo Específico de Energía Mecánica (CEEM).....	56
4.1.2. Índice de Expansión (E).....	58
4.1.3. Volumen Específico (VE).....	60
4.1.4. Evaluación de la Dureza Sensorial (DS).....	61
4.1.5. Dureza Mecánica (DM).....	63
4.2. Efecto de las condiciones del proceso de extrusión en las características funcionales (propiedades de hidratación) de harinas extrudidas.....	65
4.2.1. Solubilidad en Agua (S).....	67
4.2.2. Absorción de Agua (AA).....	69
4.2.3 Respuesta Amilográfica.....	72

✓	Consistencia inicial a 30°C (Ci) .....	72
✓	Consistencia inicial a 95°C (C95i) .....	74
✓	Consistencia final a 95°C (C95f).....	76
✓	Retrogradación.....	78
4.2.4.	Gelatinización (G).....	81
4.2.5.	Observación microscópica.....	82
4.3.	Conclusiones acerca de las características fisicoquímicas y texturales de los productos expandidos y de las propiedades de hidratación de sus harinas.....	83
4.4.	Evaluaciones nutricionales de las harinas integrales de sorgo.....	86
4.4.1.	Análisis de la composición centesimal.....	86
4.4.2.	Contenido de taninos (TA).....	89
4.4.3.	Pérdida de fitatos (Pérdida de F).....	92
4.4.4.	Contenido de polifenoles (PF).....	95
4.4.5.	Capacidad antioxidante (CAO).....	99
4.4.6.	Evaluación de propiedades nutricionales selectas.....	104
4.4.6.1.	Composición centesimal.....	104
4.4.6.2.	Determinación del contenido de Lisina disponible.....	105
4.4.6.3.	Estudio del contenido de minerales.....	106
4.4.6.4.	Disponibilidad de minerales.....	108
4.4.6.5.	Estudio de la digestibilidad proteica.....	111
4.5	Conclusiones acerca de las propiedades nutricionales.....	112
<b>5.</b>	<b>Conclusiones Finales.....</b>	<b>114</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>116</b>

**Resumen:**

El sorgo es una fuente principal de energía, proteínas, vitaminas y minerales para millones de habitantes de las regiones más pobres del mundo. Además este cereal presenta una comprobada versatilidad en resistencia y estabilidad de rendimiento bajo condiciones agronómicas muy adversas. Es un cereal sin gluten y se lo puede utilizar como materia prima para el desarrollo de alimentos destinados a la creciente población celíaca.

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de las condiciones de extrusión en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de productos extrudidos de sorgo integral de bajo contenido de taninos. Para la extrusión se utilizó un equipo Brabender 20 DN, un tornillo con RC: 4:1, una boquilla de 3x20mm y se trabajó a 150 rpm. Para analizar los efectos de las variables de extrusión se utilizó la metodología de superficie de respuesta. Las variables estudiadas fueron la temperatura de extrusión (T) (164, 182 y 200°C) y la humedad de alimentación (H) (14, 16,5 y 19%).

Del análisis de las respuestas estudiadas, se observó que el CEEM y la E disminuyeron tanto con el aumento de T y de H; mientras que en el caso del VE, los efectos de T y H son contrapuestos: VE aumenta con T y disminuye con H. La muestra de mayor dureza fue la de menor grado de cocción (GC) obtenida a 164°C y 19% y la de menor dureza aquella obtenida a 200°C y 14%H, de mayor GC. Esto indica que la dureza (DS y DM) se relacionó de manera inversa con el GC.



Con respecto a la S y AA, se observó que ambas propiedades aumentaron al aumentar T y disminuyeron con el aumento de H. Se verificó una relación directa entre S y AA, lo que sugiere que las muestras extrudidas poseerían un estado de cocción incompleto, tal como lo demostró la observación microscópica. La susceptibilidad enzimática, coincidió con lo determinado para la S y la observación al microscopio, es decir: la muestra con menor GC fue la obtenida a 164°C y 19% H y la de mayor GC, a 200°C y 14%H. Asimismo, se observó la mayor presencia de cruz de malta en las muestras obtenidas a menor T y mayor H.

El contenido de fenoles totales, taninos, fitatos y antioxidantes en sorgo, al aumentar la H de extrusión se asoció a una menor extracción de estos compuestos y una menor capacidad antioxidante.

Además, el diseño experimental utilizado, permitió elegir las condiciones de extrusión más adecuadas para la obtención de un ingrediente a base de sorgo integral extrudido, con ciertas características particulares que puedan satisfacer las exigencias del producto final. Teniendo en cuenta las características fisicoquímicas de los diferentes productos extrudidos, se seleccionó la muestra obtenida a 182°C y 14%, ya que permitió obtener buenas características, apropiadas para un producto expandido. Esta muestra fue evaluada en cuanto a la composición centesimal, la disponibilidad de lisina, de Fe y Zn y la digestibilidad proteica.

La metodología propuesta en esta Tesis ha permitido estudiar la obtención de productos expandidos y harinas precocidas de sorgo integral, mediante el

proceso de extrusión, que pueden ser utilizados como tales o como ingredientes en la elaboración de alimentos a base de grano entero.

## **1. Introducción**

### **1.1. Aspectos generales de la sociedad de consumo**

En el modelo de consumo moderno, las utilidades que brinda el alimento pueden clasificarse en dos categorías: componentes alimentaria y no alimentaria. La primera está relacionada con la satisfacción de necesidades fisiológicas y tiene límites propios; mientras que la segunda se relaciona con aspectos psicosociales y puede expandirse a medida que crece el rédito económico (es la tarea del “marketing”). Siguiendo este lineamiento es como el consumo ha adquirido un carácter dual, es decir, una parte es la tradicional (satisfacción de necesidades fisiológicas), a la que se le agregan los servicios incorporados, dando lugar a que el precio que paga el consumidor por un alimento, está influenciado en su mayor parte, por la componente no alimentaria (que crece a medida que el desarrollo económico aumenta). Es aquí donde comienza una generación de nuevos productos, teniendo en cuenta aquellas necesidades no alimentarias que el consumidor demanda, y que no están siendo satisfechas (González y col., 1988). Además, se suman los cambios provocados por la globalización de la economía, que conjuntamente con la internacionalización de los alimentos, permite a los consumidores, tener mayor información acerca de las novedades que aparecen en el resto del mundo. La situación puede ser aprovechada por la industria argentina, analizando la posibilidad de elaborar nuevos productos, para generar y satisfacer las necesidades en diferentes nichos dentro del mercado alimentario (González y col., 1988).

Por otra parte, en la actualidad, millones de personas son empujadas cada vez más a la pobreza y el aumento de los precios de los alimentos azota especialmente a la población de escasos recursos. Esa situación se debe a una combinación de factores que incluyen: 1) mayor crecimiento poblacional, 2) aumento en la preferencia por la carne, productos lácteos, 3) baja productividad agrícola, 4) aumento en los costos de energía y la competencia por tierra para la producción de biocombustibles. El deterioro de la situación económica afecta gravemente la seguridad alimentaria y nutricional de la población vulnerable (FAO, 2009).

En los últimos años, los cereales, al igual que otros alimentos, han tenido un incremento significativo en los precios. Según el Instituto Internacional de Cereales se prevé que el desarrollo de biocarburantes provoque un mayor incremento de los precios, hasta que se logren nuevos avances en la obtención de bioenergía vegetal, sin utilizar los granos comestibles. Todo esto, sin tener en cuenta problemas tales como el cambio climático y la aparición de brotes de enfermedades en las plantas, lo cual también incrementaría la tensión de los precios (USDA, 2007).

La anterior situación es de consideración, debido a que los cereales constituyen un alimento básico en todos los países del mundo y que para los sectores sociales más pobres, estos alimentos proporcionan más del 50% de los requerimientos de energía total diaria (Dendy y Dobraszczyk, 2001).

Frente a esta crisis alimentaria, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), al igual que otras entidades, desde hace varios años están trabajando y facilitando fondos para el desarrollo de

productos elaborados a partir de cereales más económicos y fácilmente adaptables a regiones semiáridas, como es el caso del sorgo. Dentro de estos proyectos, se pueden mencionar el desarrollo de harinas compuestas y alternativas que buscan incentivar la producción de materias primas locales y reducir la importación de cereales en países en vías de desarrollo (FAO, 1995; Dendy y Dobraszczyk, 2001).

## **1.2. Grano entero**

Los cereales y sus productos derivados constituyen la base de la pirámide alimentaria y se recomienda el consumo de seis a once porciones diarias. A pesar de las recomendaciones universales, incluyendo las de la Guía Dietética de los Estados Unidos de 2005, de consumir por lo menos tres raciones de cereales integrales cada día, el consumo habitual de cereal integral en países occidentales, es aproximadamente de una ración por día. Aunque los cereales son una fuente popular de alimento en América Latina, exceptuando por los patrones de alimentación tradicional como la tortilla de maíz, la mayor parte del cereal consumido es refinado. Las estrategias para incrementar la ingestión de cereales integrales en América Latina son necesarias con urgencia, para ayudar a combatir el problema creciente de enfermedades crónico degenerativas, especialmente la obesidad (Slavin, 2005).

Una investigación realizada en los Estados Unidos reportó que el consumo de cereales en adultos es de 6.7 raciones al día pero sólo 1 de estas raciones eran de cereal integral (Cleveland y col., 2000) y un estudio realizado en niños y adolescentes del mismo país, reveló que el consumo de cereales integrales era

menor a 1 ración al día (Harnack y col., 2003). Al observarse que el consumo es muy inferior en relación a la recomendación, se han fijado objetivos para el 2010 focalizados en transmitir mensajes que permitan lograr el aumento de la ingesta de alimentos a base de grano entero, destacando los beneficios que aportan a la salud (Liu, 2007).

Los hábitos alimentarios de la población argentina reflejan el consumo de una alimentación occidentalizada con predominancia de alta ingesta de carne vacuna y baja en fibra. Los elevados niveles de colesterol, de sobrepeso y los altos índices de enfermedades cardiovasculares, originan la necesidad general de reducir la ingesta de energía, grasas saturadas y trans, y colesterol en concordancia con el aumento del consumo de fibra. Este perfil hace que sean adecuadas las recomendaciones dietéticas de la Estrategia Mundial dirigida a las poblaciones (CODEX, 2006), donde se recomienda el consumo de cereales integrales.

El concepto de grano entero se refiere al cereal integral que consiste en los granos intactos, molidos, quebrados o en hojuelas, cuyos principales componentes (el endospermo almidonoso, el germen y el salvado) están presentes en las mismas proporciones en las que existen en el grano intacto. Un grano de cereal puede ser considerado como un complejo aglomerado de nutrientes, que pueden diferir marcadamente en su composición física, pero todos comparten la misma anatomía básica: una capa externa de salvado, el germen y un endospermo rico en almidón (Richardson, 2003).

Los cereales integrales son ricos en varios compuestos, incluyendo la fibra dietética, antioxidantes, minerales, vitaminas, lignanos y compuestos fenólicos

(Slavin, 2005). Particularmente, contienen altas concentraciones de vitaminas B (tiamina, niacina, riboflavina y ácido pantoténico), minerales (calcio, magnesio, potasio, fósforo, sodio y hierro) y niveles elevados de tocoferoles. Numerosos fitoquímicos, algunos comunes en muchos alimentos vegetales (fitatos y compuestos fenólicos) son responsables de la alta actividad antioxidante de los alimentos a base de cereal integral (Miller, 2002). Al evaluar la calidad nutricional de estos granos, también se debe tener en cuenta el perfil aminoacídico de las proteínas que aporta, en relación al requerimiento de quien lo consume, ya que son la principal fuente de proteínas vegetales de la alimentación.

### **1.3. Alimentos funcionales**

Los alimentos funcionales disponen actualmente de un lugar de aceptación y reconocimiento entre la población. La aparición y desarrollo de nuevos productos en el país sigue la tendencia internacional de un crecimiento sostenido, aunque en forma lenta. El concepto de alimento funcional ha sido evaluado y discutido en profundidad y existen distintos trabajos de revisión de su definición (Robertfroid, 2000). En líneas generales, se reconoce básicamente como funcionales a productos que contienen componentes bioactivos en concentraciones cuantificables, capaces de ejercer un efecto positivo sobre la salud más allá de su capacidad de nutrir, y que son consumidos como parte de la dieta habitual.

Teniendo en cuenta estos lineamientos, la mayoría de los cereales y/o sus constituyentes son utilizados usualmente para formular alimentos funcionales, debido a que promueven varios efectos benéficos como: reducción de los niveles

de colesterol en sangre, prevención de algunos tipos de cáncer, diabetes, acción laxante, disminución de enfermedades coronarias y obesidad. Se los utiliza principalmente como sustratos fermentables (prebióticos) que permiten el desarrollo de microorganismos probióticos (Vitali, 2008). En este sentido, los granos de sorgo pueden ser utilizados como componentes de alimentos funcionales, debido a su alto contenido de fibra y compuestos polifenólicos antioxidantes (Awika, 2003). En un estudio donde se evaluaron las características nutricionales, entre ellas la composición de fibra, el almidón resistente, minerales, fenoles totales y las propiedades antioxidantes, en cuatro cereales: cebada, mijo, el centeno y el sorgo, se concluyó que el sorgo y la cebada son una promesa como ingredientes de alimentos saludables (Ragaei y col., 2006). Sorgos con características especiales ya han sido utilizados para producir productos con cualidades deseables (Rudiger, 2003). Además, otra valiosa ventaja nutricional de este cereal, es que se puede utilizar como materia prima para el desarrollo de un alimento libre de trigo, avena, cebada o centeno, lo que permitirá integrar a la creciente población celíaca.

#### **1.4. Enfermedad celíaca**

La enfermedad celíaca (EC) es una enfermedad poli-sintomática producida por el daño en las vellosidades del intestino delgado cuando las personas susceptibles ingieren gluten, término utilizado para describir a las proteínas contenidas en el trigo, avena, cebada y centeno (TACC). Específicamente, éstas corresponden a las prolaminas denominadas gliadinas en el trigo, hordeínas en la cebada, secalinas en el centeno y aveninas en la avena (Shewry, 2002).



Hasta hace unos años, la EC se pensaba que era una intolerancia alimentaria poco frecuente que se limitaba a la infancia y se caracterizaba por mala absorción severa y aplanamiento de la mucosa intestinal. En la actualidad, se la considera como un trastorno con características autoinmune, que es común en la población general (que afecta a 1 de cada 100 personas), con la posible aparición a cualquier edad y con muchas presentaciones posibles. Puede empezar no sólo con la pérdida de peso y diarrea, sino también con síntomas atípicos gastrointestinales (estreñimiento y dolor abdominal recurrente) y los síntomas extraintestinales (anemia, elevaciones en las transaminasas, la osteoporosis, abortos involuntarios recurrentes, estomatitis aftosa y enfermedades asociadas a trastornos autoinmunes), o puede ser completamente asintomática. En los últimos 20 años, la precisión en el diagnóstico por serología para la enfermedad celíaca ha aumentado progresivamente con el desarrollo de pruebas altamente confiables, tales como la detección de transglutaminasa tisular y de IgA e IgG (Volta y Villanacci, 2011).

Estos estudios epidemiológicos han cambiado radicalmente los conocimientos sobre la prevalencia de la enfermedad, mostrando que la enfermedad se produce en todo el mundo con mucha más frecuencia de lo que se creía (Maki y col., 2003). La mayor prevalencia se encuentra en Europa: en Finlandia 1 de 99 personas padecen la enfermedad, 1 de 122 en Irlanda del Norte y 1 de cada 175 en Italia (Volta y col, 2001). La alta prevalencia en los niños del Sáhara (1 de 18) sorprende y puede explicarse en parte por la gran cantidad de cereales (cuscús) en la dieta y por los antecedentes genéticos particulares de esta población (Catassi y col., 1999).

En 2001 se publicó en la ciudad de La Plata, un estudio de prevalencia de la EC en la población adulta, siendo el resultado estimado de un 0,6%. Recientemente, se ha realizado un estudio multicéntrico en la población pediátrica en cinco distritos urbanos de Argentina, donde la prevalencia hallada duplica lo manifestado hasta entonces, alcanzando el 1,26% (Mora y col., 2010). Es remarcable este aumento, especialmente en edad pediátrica, en la cual la prevalencia es habitualmente menor (Fasano y col., 2003).

Sin embargo, esta tendencia del aumento de la prevalencia, si bien no puede desvincularse del uso de técnicas serológicas más sensibles, concuerda con datos de la bibliografía internacional. En Finlandia, Lohi y col. (2007) compararon los resultados del estudio de dos muestras poblacionales separadas por un lapso de 20 años, en las que se utilizó la misma serología, y observaron que en ese período la prevalencia casi se había duplicado, lo que sugiere la intervención de otros factores, probablemente ambientales, en concordancia con el aumento de otras enfermedades autoinmunes.

Las formas clínicas silentes predominan, aunque se detectan 33% de casos sintomáticos y oligosintomáticos, cuyas manifestaciones fueron déficit nutricional, diarrea crónica o distensión abdominal, lo cual sugiere que aún es una patología subdiagnosticada (Mora y col., 2010). A veces, los pacientes con EC tienen una sensible alteración de la motilidad en todo el tracto gastrointestinal, y la manifestación clínica puede ser la dispepsia, reflujo, disfagia o, más frecuentemente, grave estreñimiento (Volta y Villanacci, 2011).

Los pacientes celíacos necesitan como único tratamiento para mejorar su salud, y revertir muchas de sus complicaciones, una dieta estricta sin gluten

durante toda la vida (Van Heel Da y West, 2006). Mantener esta alimentación representa una serie de dificultades, por su elevado costo y por la prohibición absoluta de consumir alimentos que contengan trigo, centeno, cebada y avena (TACC). Estas dificultades y considerando que hasta hace unos pocos años era una enfermedad infrecuente, generan que la oferta de productos para personas con esta patología sea relativamente limitada (Castillo y Rivas, 2008). Esta situación ha cambiado en los últimos años, en que se ha llegado a reconocer la existencia de formas atípicas de la enfermedad que ha permitido mejorar la pesquisa, aumentando el número de casos diagnosticados. Además, es importante destacar que dicha cifra puede multiplicarse por cuatro o más, porque en la familia de un celíaco, por comodidad, practicidad y seguridad, todos consumen los mismos alimentos. Se diagnosticaba poco, y dado el escaso número de pacientes y la baja demanda de productos especiales, no representaba, probablemente, un área de negocios interesante (Catassi, 2007).

Para reemplazar el trigo y sus derivados se utilizan especialmente harinas sin gluten (arroz, maíz, papa, mandioca) que tienen un mayor precio y algunas deben importarse de Brasil, incrementando aún más el valor de estos alimentos. Como el gluten es una proteína muy utilizada en la elaboración de diferentes productos alimentarios, que en su forma natural no contienen gluten, se dificulta aún más la oferta de productos para los celíacos. En estos alimentos se agregan otros costos de producción por la incorporación de controles de calidad que aseguren su condición de libre de TACC, es decir, medidas adicionales para eliminar la contaminación cruzada involuntaria con harinas o ingredientes con

gluten y que se suele producir en silos, molinos, lugares de fraccionamiento y almacenamiento, producción y envasado (Méndez, 2005).

Es por esto, que resulta necesario ofrecer nuevos alimentos alternativos a base de granos enteros, que además, de evitar el gluten, den variedad a la alimentación y agreguen al producto otras propiedades funcionales y nutritivas, como mayor contenido de proteínas y minerales como el calcio y el hierro (Vitali, 2008), tan necesarios por su absorción reducida. Considerando que un gran porcentaje de pacientes presenta los síntomas atípicos gastrointestinales, como estreñimiento grave, la incorporación granos enteros permite incluir la fibra como parte del tratamiento. La dieta sin gluten supone un reto de salud pública en los países en desarrollo y si se suma a las características antes mencionadas, la utilización de sorgo como materia prima, permitiría obtener productos de menor precio accesible para todos, tal como ya se han elaborado exitosamente, productos para niños celíacos a base de sorgo (Penichet Cortiza, 2009).

## **1.5. El grano de Sorgo**

### **1.5.1. Situación actual**

El sorgo es un cereal que ha sido alimento básico importante en otros lugares del mundo como Asia y África a lo largo de muchos siglos. Este cultivo sigue siendo la fuente principal de energía, proteínas, vitaminas y minerales para millones de habitantes de las regiones más pobres (FAO, 1995). El cultivo del sorgo es frecuentemente establecido en suelos pobres por pequeños agricultores que tienen pocos recursos para controlar la humedad, disponer de fertilizantes, insecticidas y otros insumos que incrementan el rendimiento. Este cultivo presenta

una comprobada versatilidad en resistencia, contabilidad y estabilidad de rendimiento bajo condiciones muy adversas, debido a que ha demostrado su adaptabilidad a un rango variado de métodos de cultivo y clima (Machado Alcolea y col., 2005). Esto lo convierte en un cereal accesible y de bajo costo.

En Argentina, el sorgo no forma parte de los principales cultivos, pero sí le permite tener cierto protagonismo mundial, ya que la producción mundial de sorgo es 64.000.000 toneladas (tn) y Argentina produce 3.630.000 tn, quedando ubicada en el 5° puesto a nivel de producción. Si consideramos que la exportación mundial es de 6.300.000 tn y Argentina participa con 1.000.000 tn, obtiene el 2° puesto en exportación, después de Estados Unidos (4.000.000 tn). Los principales destinos de las exportaciones son Japón (35%), Chile (21%), Brasil (8%) y Colombia (7%).

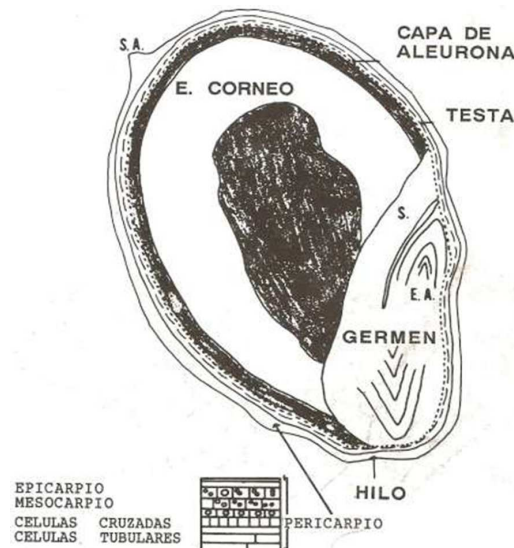
El consumo interno se mantiene estático y se trabaja arduamente para satisfacer los requisitos del mercado externo (Batista, 2010) especialmente los de Japón, cuya limitante actual es el porcentaje de taninos presentes. La exigencia es que sea menor a un 0,2% y si no se logra satisfacer esto, las sanciones implican descuentos en el precio. En las normas del CODEX que rigen para la harina de sorgo, se establece que el contenido de taninos no deberá exceder el 0,3% respecto a la materia seca. En el nuevo estándar de comercialización de sorgo Resolución 554/2011 Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA, 2011), NORMA XVIII. SORGO GRANIFERO 2.2.1: se clasifica al sorgo como bajo tanino o sin taninos condensados, cuando el lote o partida contenga no más de cinco por ciento (5%) de granos con taninos condensados. Entiéndase por granos con taninos condensados, aquellos que son

identificados como tales en la “prueba de blanqueo con hipoclorito de sodio (lavandina) con base hidróxido de sodio”

### **1.5.2. Generalidades, composición y características**

El sorgo contiene aproximadamente de 7 a 16% de proteínas, 55-75% de almidón, 0,5-5% de lípidos, 1,6% de fibra cruda, y 1 a 4,5% de cenizas, en una base de peso seco (Martínez y Pau, 1992; Serna-Saldívar y Rooney, 1995). Aproximadamente el 80%, 16% y el 3% de las proteínas se encuentran en el endospermo, en el germen y en el pericarpio, respectivamente (Taylor y Schussler 1986). El almidón, principal componente de los granos, comprende el 80-82% del endospermo, y tiene una composición similar a la de los gránulos de almidón de maíz (Serna-Saldívar y Rooney, 1995). El almidón del sorgo contiene 70-80% de amilopectina y 20-30% de amilosa. En el sorgo ceroso, o waxy, el almidón está compuesto por amilopectina (más de 97%) con propiedades similares a las de maíz waxy (Serna-Saldívar y Rooney, 1995). La dureza del endospermo en granos de sorgo, se determina por la genética y el medio ambiente (Rooney, 2004). El endospermo se compone de dos partes: una córnea, que contiene gránulos de almidón estrechamente vinculados en una matriz de proteína rígida y se caracteriza por ser translúcida y más resistente a la molienda, y la otra harinosa opaca, blanda, con menor contenido de proteínas y más fácil de romper durante el procesamiento (Rooney, 2004). El germen representa un 9,8% del peso del grano. En él se concentran las vitaminas, minerales, proteínas, azúcares y el aceite y resulta la parte con mayor valor nutricional. El resto corresponde a la

cáscara o pericarpio, el cual posee gran contenido de fibra (FAO, 1995) (Figura N°1).



**Figura 1.1.** Componentes anatómicos del grano de sorgo (Hoseney, 1991).

Las primeras variedades de sorgo tenían diversidad de colores, algunas de ellas, tales como la Hegari, eran de color “blanco tiza”, otras como Martin y Wheatly tenían un grano de color rojo tenue y otras tenían semillas de color marrón oscuro. Con el desarrollo de los híbridos de sorgo, un más amplio rango de colores se hizo posible, dado que semillas de diferentes colores fueron cruzados para hacer tales híbridos. Hoy en día, los productores describen a los granos como de color blanco, amarillo, crema hetero-amarillo, hetero-blanco, bronce, anaranjado, rojo oscuro rojo-marrón, blanco-marrón, amarillo limón, blanco tiza, rojo intenso, blanco perla, etc. (Massigoge y col., 2009).

Por otra parte, el color del grano de sorgo depende de varias características morfológicas del mismo, como por ejemplo color y espesor del

pericarpio, color del endospermo, presencia o ausencia de ciertos genes y existencia o no de la testa que contiene a los taninos, por lo que estos últimos no son los únicos responsables del color del grano, sino que esta característica es la resultante de varios factores. En el mercado Argentino actual, todos los sorgos con taninos condensados, toman una coloración marrón-café en el lapso de maduración a cosecha de los mismos. De esta manera, los sorgos marrones son fácilmente identificables, al ser comparados con los sorgos rojos o blancos sin taninos condensados y en consecuencia, sin testa pigmentada (Massigoge y col., 2009).

Diversos factores genéticos también afectan al color y a la apariencia del sorgo granífero. Los genes R e Y controlan el color del pericarpio, y combinaciones de estos genes producen granos de color rojo (R\_ Y\_), amarillo limón (rrY\_) y blanco (R\_ yy o rryy) (Figura 1.2).



**Figura 1.2.** Colores de los granos de sorgo acorde a los genes.

El gen intensificador (I) afecta a la intensidad del color del pericarpio (Hahn y col., 1984). El color está influenciado por la presencia de una testa pigmentada y



un gen propagador (S). El resultado de los genes dominantes  $B_1B_2$  es una testa pigmentada con taninos condensados. Sin embargo, los homocigotos de genes recesivos ( $b_1b_1b_2b_2$ ,  $B_1b_2b_2$ ,  $b_1b_1B_2$ ) harán que la testa no esté pigmentada (Serna- Saldívar y Rooney, 1995). Cuando una testa pigmentada está presente, un gen propagador dominante (S) causa un aumento de taninos y polifenoles en la testa de las semillas y en las capas del pericarpio, dando al sorgo un alto contenido de taninos y color marrón ( $B1_B2_S1_$ ) (Rooney y col., 1982).

Los sorgos se clasifican, según la presencia y la estructura de taninos en:

Tipo I: sorgos con niveles bajos de fenol y sin testa pigmentada y sin taninos. Los rojos poseen bajos niveles de fenol y antocianinas, y los blancos pocos flavonoides.

Tipo II: sorgos con taninos y testa pigmentada, poseen el gen recesivo S y los taninos sólo pueden ser extraídos con metanol ácido.

Tipo III: sorgos con taninos y testa pigmentada, poseen el gen dominante S y los taninos pueden ser extraídos con metanol o metanol ácido (Hahn y col., 1984). Es un sorgo marrón con testa pigmentada gruesa y de todos los tipos de sorgo es el que tiene mayor cantidad de taninos, fenoles totales y actividad antioxidante. Este es el sorgo resistente a las aves (Rooney y col., 1982), ya que los taninos actúan como mecanismo de defensa, otorgándole sabor astringente.

Distintos estudios muestran que los granos, las verduras y las frutas contienen una gran variedad de sustancias conocidas como "fitoquímicos". El término "fitoquímicos" se refiere a todos los productos químicos de origen natural presente en las plantas, especialmente aquellas que son biológicamente activas (Zielinski y Kozowska, 2000). Los fitoquímicos más importantes incluyen ácidos

fenólicos, flavonoides, así como muchos otros polifenoles. Estos antioxidantes naturales puede tener una o más de las siguientes funciones: radicales libres, agentes reductores y complejantes de metales, además juegan un papel importante en la prevención de los cambios indeseables en el sabor y calidad nutricional de los alimentos. En el sorgo, los flavonoides como las catequinas, las proantocianidinas (taninos), y las antocianinas son los compuestos fenólicos más abundantes y los antioxidantes más importantes encontrados en el sorgo, dependiendo del tipo y la variedad (Awika, 2000).

El sorgo es en general una fuente rica de vitaminas B y algunas variedades de endospermo amarillo contienen beta-caroteno, que podría ser convertido en vitamina A por el cuerpo humano. En el grano de sorgo también se han encontrado otras vitaminas liposolubles como D, E y K. Entre las vitaminas B, las concentraciones de tiamina, riboflavina y niacina son semejantes a las del maíz. Sin embargo, diferentes investigadores han observado amplias variaciones en las concentraciones, especialmente para la niacina (Hulse y col., 1980).

Todos los granos de sorgo, en mayor o menor medida, tienen sustancias tánicas polifenólicas. Algunos sólo tienen polifenoles solubles o hidrolizables (ácidos gálico y elágico) y otros, además de éstos, poseen taninos condensados (catequinas, flavonoides, etc.). Estos últimos están ubicados en la testa o cubierta seminal y de acuerdo al grosor de esta, varía su contenido (Castro, 2002). Los taninos, como ya se mencionara, son señalados como los responsables de la mayor o menor preferencia de los pájaros a los granos de sorgo (entre otras cosas generan astringencia). Esta ventaja agronómica se acompaña con desventajas nutricionales y calidad reducida en los alimentos (Serna-Saldívar y

Rooney, 1995). Bajo condiciones óptimas, el tanino del sorgo es capaz de unirse y precipitar al menos 12 veces su propio peso de proteína (Butler y col., 1984). En general, las características de las proteínas que se unen fuertemente a taninos condensados del sorgo son relativamente grandes, de estructura flexible, abierta y son ricas en prolina (Butler y col., 1984), características presentes en las  $\gamma$ -Kafirinas, prolaminas del sorgo y principal proteína de almacenamiento (Taylor, 2007). Se ha sugerido que el efecto antinutricional de los taninos se debe a su capacidad de formar complejos con proteínas, menos digeribles y no a la inhibición de las enzimas digestivas (Butler y col., 1984), pero además reducen la biodisponibilidad de micronutrientes (Walter, 2004). Los fitatos se unen a minerales que son necesarios como cofactores, lo que interfiere con varios procesos metabólicos esenciales, especialmente los de la utilización de las proteínas (Harland y Oberleas, 1986) y también a minerales que no son cofactores, por ejemplo, calcio y hierro. La molienda, la cocción y otros procesamientos favorecerían la oportunidad para la interacción de los taninos con las proteínas de la dieta, antes del encuentro con las enzimas digestivas. (Butler y col., 1984). No existen dudas de las interacciones taninos proteínas, pero hay dudas sobre si esto ocurre antes o después de la cocción.

Se observó que durante la cocción húmeda del sorgo se produce un mayor entrecruzamiento de las proteínas, generando una menor digestibilidad. Surge de aquí la propuesta de utilizar otras tecnologías actuales para mejorar la digestibilidad del sorgo, incluyendo la cocción seca por extrusión (Hamaker y col., 1994). El uso del proceso de extrusión para la cocción es una alternativa tecnológica para elaborar alimentos de interés social, como sopas crema, papillas,

atoles, botanas enriquecidos, para meriendas escolares y proteína vegetal texturizada (González y col., 2002). Prácticamente no hay trabajos en nuestro país que estudien la obtención de productos expandidos a partir de harinas integrales de sorgo.

### **1.5.3. Utilización del Sorgo**

El mercado derivado del sorgo es muy amplio, dado que este cereal puede ser molido (por molienda seca o húmeda), extrudido, popeado, panificado, pastificado, fermentado, es decir se le pueden aplicar todos los procesos que se utilizan actualmente en la tecnología de cereales.

El Gobierno de Estados Unidos proveyó a países en desarrollo, por intermedio de empresas privadas, de alimentos formulados para niños que contienen sorgo y fuentes de proteínas de calidad, como harina de soja (Hahn, 2007).

Hace 50 años, se intentó reemplazar el 25% de la harina de trigo en el pan, por harina de sorgo. Desarrollaron recetas para galletitas de ricota, bollitos, pan, pancitos, pan de jengibre, tortas y waffles. La harina de sorgo molida puede reemplazar toda la harina de trigo en fórmulas de pan con algunas modificaciones en tipo y cantidades de ingredientes. Este mismo estudio indicó que, en el pan con levadura, se puede reemplazar hasta la mitad de la harina de trigo por sorgo. Otro uso es en la elaboración de tortas, donde se puede agregar para endurecer las harinas de trigo rojo de invierno. Además, la harina de sorgo puede utilizarse en el procesamiento de la carne. La función es reducir el costo de los embutidos y actuar como ligante (Hahn, 1970).

Durante la Segunda Guerra Mundial, la escasez de los productos elaborados con maíz y arroz ocasionó que la industria cervecera usara otros cereales. El consumo de los productos de sorgo molido para la elaboración de cerveza llegó a las 70.800 tn en 1946. Al finalizar la guerra, los fabricantes de cerveza volvieron a usar los materiales que estaban más acostumbrados y, temporalmente, el interés en la elaboración de cerveza con sorgo fue desapareciendo. En los últimos años, varias fábricas de cerveza volvieron a usar granos de sorgo en la fabricación. Con las pruebas piloto de elaboración de cerveza y el gran uso de plantas, se probó que la cerveza que se fabrica con granos de sorgo es totalmente equivalente en análisis químico, sabor y estabilidad a las que se fabrican con otros sucedáneos de la malta (Hahn, 1970).

El sorgo malteado se usa como alimento en muchas partes del mundo. Uno de sus mayores usos es en la cerveza de Kaffir, la bebida tradicional de los habitantes de Bantu en el Sur de África. Esta bebida tiene un sabor ácido muy rico y la consistencia de una sopa viscosa. Se consume en un estado activo de fermentación. Las principales materias primas de las industrias de fermentación son el almidón y el azúcar. Éstas se pueden obtener de varias fuentes y se utiliza sorgo cuando su precio es favorable.

No obstante la producción de alcohol etílico es el producto de fermentación de sorgo más antiguo e importante (Hahn, 1970).

Los usos industriales de la harina de cereal aumentaron considerablemente durante los últimos años. Los molineros intensificaron sus esfuerzos para capturar mercados pertenecientes tradicionalmente al almidón y desarrollaron una cantidad de usos nuevos. El sorgo también se utiliza para alimentos para mascotas,

industria de la construcción, aglutinante para fundición, aglutinante para carbón, refinamiento de minerales, fabricación de papel, almidón para perforación y adhesivo para corrugado (Hahn, 1970).

En Argentina, el mercado interno es el destino principal del grano de sorgo, representando más del 90% de la producción. Se utiliza básicamente para consumo animal (más del 80%) y el resto se destina al proceso de molienda, obteniendo las harinas para consumo animal y humano, utilizada para la elaboración de pan, pastas, galletitas, cereales para desayuno, alcohol etílico utilizado en la elaboración de bebidas alcohólicas como licores y whisky, así como también en perfumerías y el etanol anhidro para la elaboración de biocombustibles. Cabe destacar que en el caso de la molienda, las harinas refinadas obtenidas pierden el carácter de grano entero.

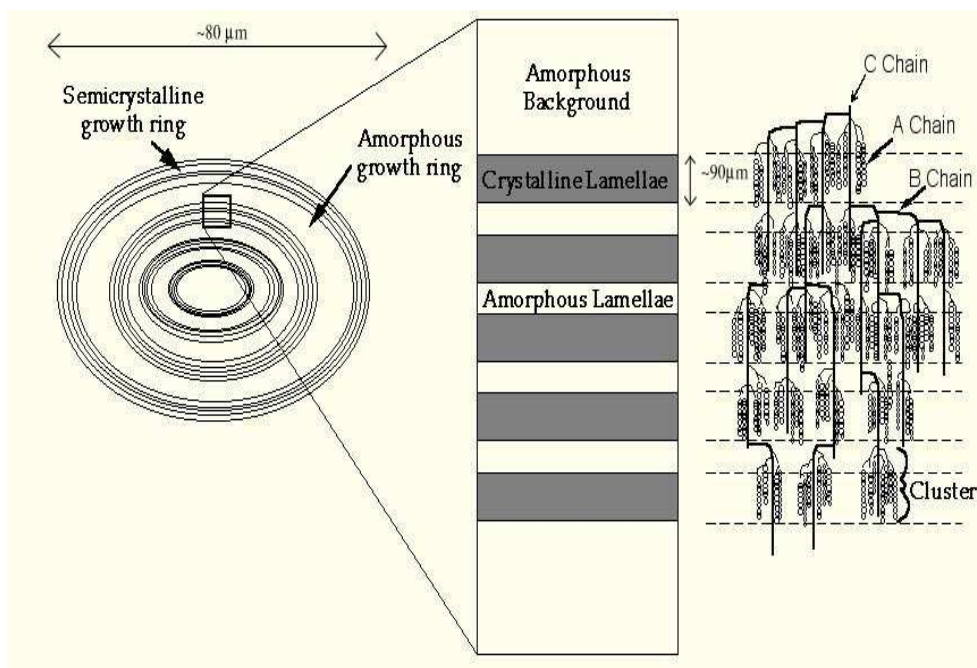
### **1.6. El Almidón**

Los cereales almacenan energía en forma de gránulos de almidón, siendo ésta la principal función desde un punto de vista nutritivo. Desde el punto de vista de la producción de alimentos, el almidón presenta propiedades físicas interesantes. La cantidad en la que se encuentra, varía con el tipo de cereal, generalmente entre un 60 y 75 %.

El almidón se encuentra en estado granular y está formado por un arreglo estructural de polímeros (amilopectina y amilosa, con elevada polidispersidad). La compleja estructura es semicristalina (un 30%) y se ha propuesto un modelo de "cluster" con capas alternadas, cristalina y amorfa, que permite explicar el

comportamiento fisicoquímico del almidón (Blanshard y Bowler, 1987) (Figura 1.3).

Su composición química es la de un polímero formado únicamente por unidades glucosídicas, es decir, son macromoléculas formadas por gran cantidad de  $\alpha$ -D-glucosa unidas por enlaces glicosídicos  $\alpha(1-4)$ , con ramificaciones en  $\alpha(1-6)$  (amilopectina) y contiene un número de constituyentes menores que afectan las propiedades del almidón, como lípidos mayormente polares, que están presentes entre 0,5 y 1 %, contiene fósforo en forma de fosfolípidos (también como ésteres fosfóricos en el caso del almidón de papa), y proteína en proporciones menores a 0,05 % (Hoseney, 1986).



**Figura 1.3.** Modelo estructural para el gránulo de almidón, basado en observaciones microscópicas luego de ataques químicos y enzimáticos y el modelo de Cluster para la amilopectina.

Tal como se ha dicho, se pueden distinguir dos tipos de polímeros, cuya diferencia principal radica en que la amilosa es básicamente lineal y la amilopectina ramificada. El polímero lineal tiene una masa molar media aproximada de 250.000 Da (1500 unidades de glucosa anhidra), que varía no sólo entre especies sino también del grado de madurez. La amilosa suele asociarse con otras moléculas de amilosa y precipitar de la solución (retrogradación) y finalmente puede cristalizar. La amilopectina presenta como la amilosa, una parte lineal, pero además está ramificada en mucha mayor proporción, con 4 a 5% de enlaces glicosídidos  $\alpha(1-6)$ , responsables de las ramificaciones. Este nivel de ramificación produce una longitud de cadena promedio de 20 a 25 unidades de glucosa (aunque el rango va de 10 a 100 unidades de glucosa), generando una masa molar aproximada de  $10^8$  Da. Se pudieron identificar tres tipos de cadenas: cadena tipo A, compuesta de glucosa unidas por enlaces  $\alpha(1-4)$ ; cadena tipo B, compuesta de glucosa unidas por enlaces  $\alpha(1-4)$  y  $\alpha(1-6)$ ; cadena tipo C, compuesta de glucosa unidas por enlaces  $\alpha(1-4)$  y  $\alpha(1-6)$  y que además incluyen el grupo reductor (Abd Karim y col., 2000). No obstante esta clasificación no es muy utilizada, a luz de los nuevos métodos cromatográficos.

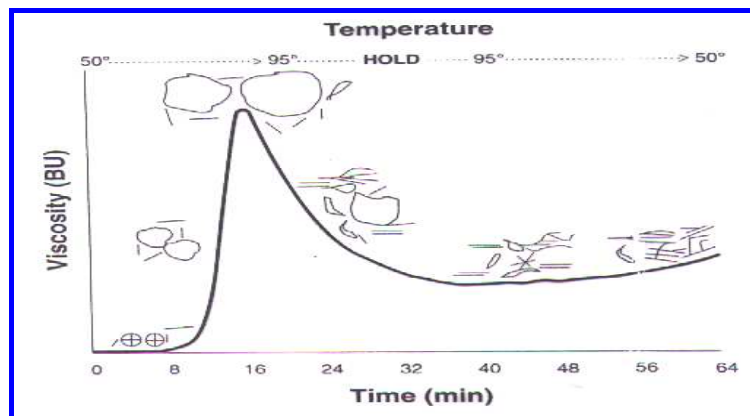
Los gránulos de almidón son semicristalinos, por poseer zonas parcialmente amorfas y otras parcialmente cristalinas; el carácter amorfo está dado por la amilosa que está distribuida al azar entre los agregados (o "clusters") de ramas de amilopectina que generan el carácter cristalino (Abd Karim y col., 2000).

Existen varias propiedades que posee el almidón y que determinan la forma en que debe tratarse, según el uso para el que se le requiera.



La gelatinización se define como la pérdida de la cristalinidad de los gránulos de almidón en presencia de calor y exceso de agua, con muy poca o ninguna ocurrencia de despolimerización. La gelatinización ocurre en un rango estrecho de temperaturas que varían dependiendo de la fuente del almidón y de la severidad de los tratamientos previos aplicados. Cuando se calienta la dispersión de almidón, la estructura absorbe agua limitadamente, hasta que al alcanzar la temperatura de gelatinización, la movilidad térmica de las moléculas y la hidratación provocan el hinchamiento de los gránulos, proceso que involucra la pérdida de cristalinidad y el ingreso de agua masivamente. La viscosidad de la dispersión depende de la concentración y del tamaño de los gránulos hinchados (función del agua absorbida). Cuando la dispersión es sometida a esfuerzos de corte (agitación), los gránulos hinchados pueden fragmentarse, provocando una disminución brusca de la viscosidad (tal es el caso de la respuesta amilográfica de almidones de fácil cocción, como son los de papa, mandioca y cereales waxy) (Figura 1.4). Luego de la etapa de gelatinización, la dispersión es enfriada y el descenso de la temperatura, provoca el aumento de la viscosidad, particularmente debido al proceso llamado retrogradación o asociación de las cadenas de amilosa (por interacciones de puente hidrógeno). El desarrollo de este proceso de agregación de las cadenas lineales implica la formación de una red macromolecular en la que quedan “atrapados” los gránulos de almidón y sus fragmentos. Como consecuencia de este proceso, la viscosidad de la dispersión aumenta. Tal aumento será mayor cuanto mayor sea el tamaño de las partículas dispersas en la red. Al dejar de agitar, la red formada, evoluciona (con el aumento de las interacciones puente hidrógeno) hacia una nueva estructura tipo gel, que

con el tiempo, puede segregar agua (sinérisis). La sinérisis (o precipitación de la masa, dejando agua sobrenadante), depende del nivel de consistencia alcanzado. En el caso de almidón de papa y de los waxy el incremento de viscosidad es bajo, debido a que los gránulos hinchados de estos almidones son muy débiles y se desintegran con facilidad. Mientras que en el caso de los almidones de cereales (no-waxy) los gránulos hinchados son más resistentes y mantienen tamaños grandes, y consecuentemente la consistencia de la dispersión aumenta mucho, a medida que la retrogradación transcurre.



**Figura 1.4.** Esquema representativo de los cambios de la viscosidad medidos mediante un viscoamilograma (Torres, 2005).

Todos estos fenómenos son de interés por que afectan la calidad, aceptabilidad y vida de útil de los alimentos que contienen almidón. La gelatinización es de primordial importancia en la industria de alimentos porque tiene un impacto fundamental sobre la textura de los productos con almidón, en cambio la retrogradación puede ser deseable o indeseable.

## **1.7. El proceso de extrusión**

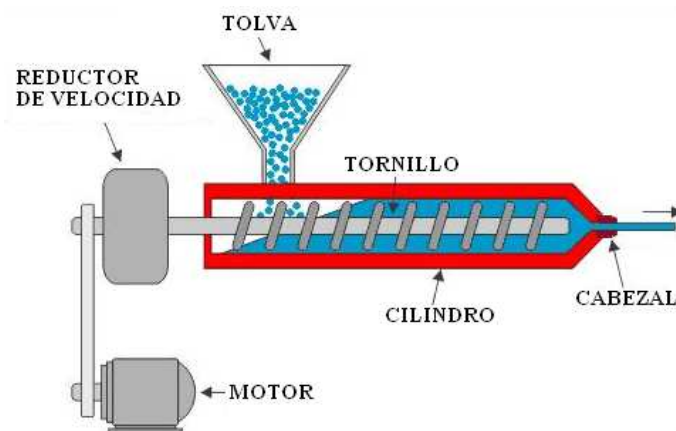
### **1.7.1. Generalidades**

La palabra extrusión proviene del latín "extrudere" que significa forzar un material a través de un orificio y se debe conjugar como el verbo "difundir". Las tecnologías de extrusión tienen su origen en la industria de los plásticos. La cocción por extrusión ha ganado popularidad en la industria de alimentos en los últimos años, debido a diversos factores tales como su mayor versatilidad y flexibilidad de operación, permitiendo obtener una gran diversidad de productos en forma continua. Posibilita el procesamiento en diversas formulaciones, adecuación del nivel nutricional según las necesidades; bajo costo de procesamiento, mínimo deterioro de nutrientes en el proceso, eficiente utilización de la energía, ausencia de efluentes, inactivación de enzimas y factores antinutricionales (Apró y col., 2000).

Los primeros extrusores para alimentos se registraron alrededor del año 1870 eran a pistón y se utilizaban para producir salchichas y carnes procesadas; pero luego, entre 1935 y 1940 los extrusores de tornillos comenzaron a ser utilizados por la industria alimentaria para elaborar fideos y dar formas a masas de cereales precocidas. Entre 1940-1950 aparecieron los extrusores-cocedores que son usados para elaborar botanas y harinas precocidas (González y col., 2002).

La extrusión de alimentos es un proceso en el que un material es forzado a fluir, bajo diferentes condiciones de mezclado, calentamiento y cizallamiento, a través de una boquilla de una dada geometría, para dar forma o expandir los ingredientes. Puede ser considerado como un reactor continuo en el que se

desarrolla un proceso HTST (alta temperatura-corto tiempo) que transforma una variedad de ingredientes a productos intermedios o terminados como por ejemplo: cereales para desayuno, snacks (aperitivos salados y dulces), alimentos para bebés, sopas instantáneas, rebozadores y coberturas, proteínas vegetales texturizadas, sustitutos de carne, almidones modificados, productos de confitería, pastas (fideos), bebidas en polvo, galletitas productos dietéticos, granolas, cucuruchos, etc. (González y col., 2002; Apró y col., 2000) (Figura 1.5).



**Figura 1.5.** Esquema general de una máquina extrusora. (Vargas y col., 2008).

La extrusión, además se caracteriza por ser una técnica eficiente y con múltiples ventajas en la cocción de cereales, por ejemplo: inactivación térmica de inhibidores y factores que alteran la digestibilidad o el gusto; interacción entre proteínas y demás ingredientes, producción de un alimento sanitariamente adecuado, alta estabilidad del almacenaje, posibilidad de dar formas y textura diferentes, agregar diversos sabores, colores. El objetivo general de la extrusión de alimentos puede ser variado: lograr la cocción, pasteurización, expansión, reducción de humedad, homogeneización y/o reestructuración (González y col., 2002; Apró y col., 2000).

Los extrusores pueden clasificarse en tres categorías principales: extrusores de pistón, extrusores de rodillos y extrusores de tornillo. Los extrusores de pistón, que son los más sencillos en diseño, se emplean principalmente para dar forma. Ellos consisten de un solo pistón o una serie de pistones lo cuales depositan cantidades muy precisas de material en un transportador de banda ancha. Estas máquinas se usan comúnmente en la producción de dulces, por ejemplo para depositar el relleno central de los chocolates. Los extrusores de rodillos que también se emplean para dar forma, consisten en dos rodillos que giran en sentidos opuestos a velocidad similar o diferencial y tienen superficies lisas o perfiladas. La abertura entre los rodillos puede ser cerrada para comprimir el material que pasa a través de ellos, o el extrusor puede estar diseñado para no impartir ningún tipo de presión. Los extrusores de tornillos pertenecen a la tercera categoría y emplean un tornillo sencillo, tornillos gemelos (tween screw o doble tornillo) rotando dentro de un cañón estacionario para empujar el material hacia adelante y a través de un orificio especialmente diseñado llamado dado o boquilla. Varios parámetros tales como la configuración de los tornillos, la velocidad de rotación y la temperatura de las distintas zonas del cañón, son seleccionados cuidadosamente para que su influencia en la extrusión sea la deseable (Harper, 1992).

Hay muchos tipos y variedades de extrusores de alimentos, pero todos tienen en común ciertos elementos, como el/los tornillos que giran dentro de un cilindro, por medio de un motor eléctrico, cuya potencia depende de la capacidad de producción y/o del diámetro del tornillo. Los ingredientes relativamente secos, con una humedad entre 15 a 25 %, son alimentados al extrusor y la fricción entre

el producto y el tornillo transportador, incrementa rápidamente la temperatura del producto a 140-170 °C durante el veloz tránsito, de 15 a 90 segundos, a través del cilindro. El cilindro, para la descarga final del extrusor está equipado con un dado restrictivo (que causa el aumento de presión) para formar el producto dentro de la boquilla del extrusor. La alta presión dentro del extrusor previene la ebullición del agua durante el proceso y cuando el material cocido es forzado a través del dado, esta presión es liberada y el agua líquida pasa a estado vapor de manera explosiva, provocando la expansión de la masa extrudida, con su correspondiente pérdida de humedad y el descenso en la temperatura. Se ha trabajado extensivamente con extrusores autógenos, cuya única fuente de energía es la mecánica entregada al motor para producir la rotación del tornillo, la cual se disipa como calor en la misma masa que se extrude. Este equipo trabaja bajo condiciones de baja humedad de la mezcla que se extrude (menos del 20%) y se pueden obtener productos precocidos a partir de mezclas de cereales y soja (Harper, 1981). En este grupo se encuentran los llamados LEC, (extrusores de bajo costo)

Podemos decir que la extrusión combina varias operaciones unitarias, mezclado, amasado, cocinado, formado, enfriado y/o cortado, y la combinación de estas operaciones es posible gracias a la cantidad de variables tales como velocidad de alimentación, humedad, velocidad del tornillo, temperaturas y la configuración de la boquilla (González y col., 2002). Entonces para producir una variedad de productos se deberá tener en cuenta el material de alimentación, las condiciones de extrusión y la configuración del tornillo, cañón y boquilla (Frazier y col., 1984).

### **1.7.2. Factores que afectan el proceso de extrusión**

El grado de cocción (GC) se incrementa al aumentar la temperatura y la relación de compresión del tornillo y al disminuir tanto la humedad como el diámetro de la boquilla. Un aumento de velocidad de rotación (rpm) se traduce en un menor tiempo de residencia (TR) y por lo tanto un menor GC, pero simultáneamente es mayor el gradiente de velocidad y por lo tanto es mayor la intensidad de los esfuerzos de corte producidos. Si la magnitud del efecto del TR es menor que la del efecto de fricción, el GC aumentará con el aumento de rpm. Esto es lo que ocurre en la mayoría de los casos, sólo para condiciones de bajo GC (alta humedad, diámetros de boquilla altos y baja relación de compresión), el aumento de rpm produce una disminución del mismo. Otro aspecto a destacar es que la temperatura es considerada una variable independiente solo en el caso de la extrusión con control de temperatura desde el exterior, para el caso de extrusores autógenos la misma debe considerarse una respuesta, ya que es la temperatura de equilibrio entre el calor disipado a través de la superficie y el calor generado por fricción (González y col., 2002).

Las características de la masa que fluye dentro del extrusor y sus propiedades finales dependen de su composición: humedad, materia grasa, fibra, almidón, proteína, sales, emulsionantes y del diseño particular que provoca mayor o menor interacción partícula-partícula.

Definidas las condiciones de extrusión (relación de compresión del tornillo, velocidad de rotación, diámetro de la boquilla y nivel de temperatura a controlar, tanto en la zona del cilindro como de la boquilla) y el material a extrudir (tamaño de partículas, humedad, etc.), la operación comienza alimentando material con

una humedad suficiente para evitar una excesiva presión inicial. Luego se introduce el material en estudio manteniendo siempre llena la zona de alimentación del tornillo. La toma de muestras se realiza una vez que se alcanza el estado estacionario, es decir cuando el caudal de salida ( $Q_s$ ), la presión y el torque (medido sobre el eje del motor), se mantienen constantes. Este  $Q_s$ , se refiere a la humedad de alimentación ( $Q_a$ ), habiendo sido previamente determinado el caudal másico de sólido seco ( $Q_{ss}$ ) (González y col., 2002).

En el proceso encontramos variables independientes, variables dependientes y respuestas:

#### **VARIABLES INDEPENDIENTES**

- Humedad
- Tipo y composición del material
- Intercambio de calor
- Temperatura
- Grado de Alimentación
- RPM

#### **VARIABLES INDEPENDIENTES DEL DISEÑO**

- Geometría
- Cilindro
- Tornillo
- Boquilla

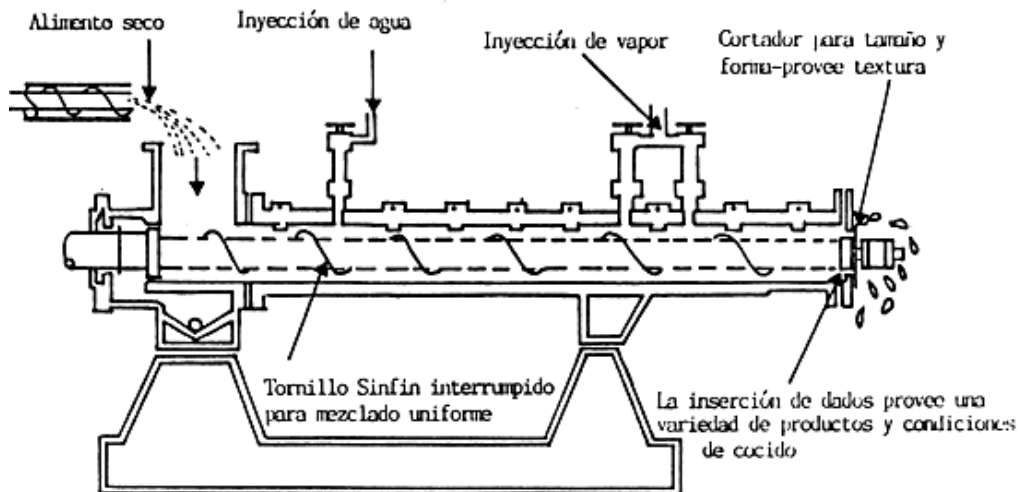


## RESPUESTAS

- Presión
- Temperatura (si es autógeno)
- Caudal Másico
- Energía Mecánica
- Distribución de tiempo de residencia
- Propiedades del producto

### 1.7.2.1. Parámetros de operación del extrusor monotornillo

La Figura 1.6 muestra el esquema de un extrusor monotornillo:



**Figura 1.6.** Esquema de un extrusor monotornillo para alimentos.

- ✓ Geometría del tornillo: Los parámetros que se pueden mencionar en un extrusor monotornillo incluyen: el diámetro, el filete del tornillo, la separación entre cilindro y lomo del filete y el paso del tornillo.

- ✓ Largo del extrusor: afecta al tiempo de residencia y al gradiente de presión.
- ✓ Características de la boquilla: La boquilla puede ser de bronce, aleación de bronce, acero inoxidable, etc. Siendo el primero el más usado ya que se puede modificar con facilidad, además permite conductividad, cuando se requiere de calentamiento.
- ✓ Velocidad del tornillo: La velocidad del tornillo afecta, tal como se ha explicado, al tiempo de residencia y al gradiente de velocidad impuesto al material que es transportado a lo largo del tornillo.
- ✓ Temperatura del cilindro: Se podrá controlar desde el exterior o será una respuesta.

#### **1.7.2.2. Propiedades de la alimentación**

- ✓ Tipo de material alimentado: La naturaleza del material alimentado, como su contenido de almidón, proteínas, lípidos y humedad definen las características del producto extrudido. El pH del material también influye en las características de producto obtenido, ya que pueden influenciar el estado de las proteínas durante la extrusión, causar cambios en el color, en el contenido de productos volátiles y de productos nutritivos.
- ✓ Tamaño de la partícula del material alimentado: El tamaño de partículas adecuado para la extrusión, se relaciona con la altura del filete correspondiente al canal del tornillo y debe ser al menos 10 veces menor a ésta.
- ✓ Humedad: el nivel de humedad afecta principalmente a la fricción desarrollada durante la extrusión. Aunque, en condiciones de alta humedad,

también afecta a la gelatinización. En la elaboración de expandidos, se verifica una relación inversa entre la humedad y la expansión.

✓ Otros ingredientes: Ingredientes como aceites y emulsificantes pueden ser sumados al material alimentado, actuando como lubricantes y disminuyendo la fricción y la cantidad de calor disipado (Haller, 2008).

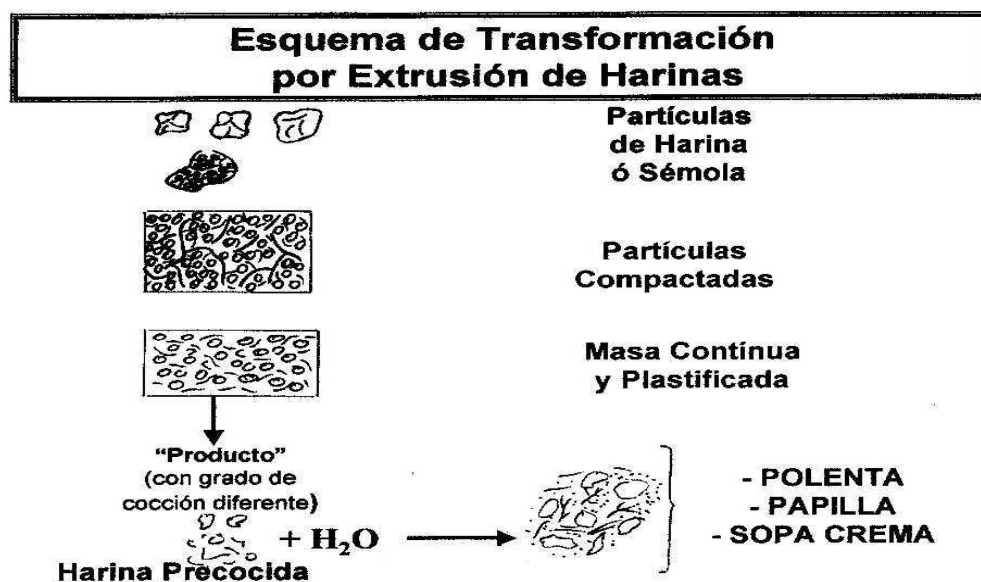
### **1.7.3. Extrusión de cereales**

Los productos a base de cereales, representan un volumen importante de los expandidos e inflados. Algunos ejemplos de estos alimentos son los “snacks”, los cereales instantáneos, las pastas, etc. (Enríquez, 2004), plantean que existe una amplia variedad de productos secos de cereales molidos que han sido utilizados en la producción de alimentos inflados y expandidos entre los que se encuentran la avena, que requiere de altas temperaturas y humedades para lograr ser expandida, debido a su alto contenido de grasa. La cebada ha sido poco usada en la extrusión. El trigo requiere altas temperaturas y humedades para su expansión, debido al alto contenido de proteína y gluten. El maíz es el grano de cereal más comúnmente empleado para la extrusión, debido a su bajo costo y su capacidad de expandirse. El arroz es un grano de cereal bajo en proteínas y grasa, su color blanco y su buena capacidad de expansión hacen que sea el producto de excelencia para cereales expandidos. El centeno, de sabor singular y color oscuro, se comporta como el trigo. Por su parte, el sorgo tiene características similares a la del maíz.

Los materiales que se someten al proceso de extrusión sufren transformaciones sucesivas durante el proceso (Figura 1.7). Es importante

destacar que la transformación del flujo sólido en flujo viscoso es necesaria para que se produzcan los cambios estructurales y consecuentemente la cocción del almidón. De lo contrario la operación se reduce al transporte del material y al pasaje a través de la boquilla, es decir, el extrusor actúa como una pelleteadora a tornillo.

Las condiciones de temperatura, presión y esfuerzos de corte a que se somete el material que se extrude pueden producir cambios en su composición química, llevando a una modificación estructural del almidón y de las proteínas (Mitchell y Areas, 1992).



**Figura 1.7.** Transformaciones sucesivas durante la extrusión.

En el proceso de extrusión de alimentos, el almidón es el componente que juega el papel más importante, ya que los cambios que sufre el almidón afectan la expansión y textura final del producto extrudido (Lai y Kokini, 1991). Las modificaciones en la estructura del almidón, tales como fusión, gelatinización,

fragmentación y dextrinación, son afectados por diferentes factores como la relación agua/almidón, temperatura, gradientes de velocidad aplicados, tamaño de partícula, la relación amilosa/amilopectina, presencia de otros ingredientes (azúcar, sal, proteínas y lípidos, entre otros) (Kokini y col., 1992; Mason y Hosney, 1986).

#### **1.7.4. Transformaciones del material durante la extrusión**

El almidón es insoluble en agua fría; pero cuando se calienta con agua, la absorbe, se hincha y se dispersa; este proceso se llama gelatinización. Se lo puede clasificar como una cocción hidrotérmica. En el caso de la cocción por extrusión, el proceso es termomecánico.

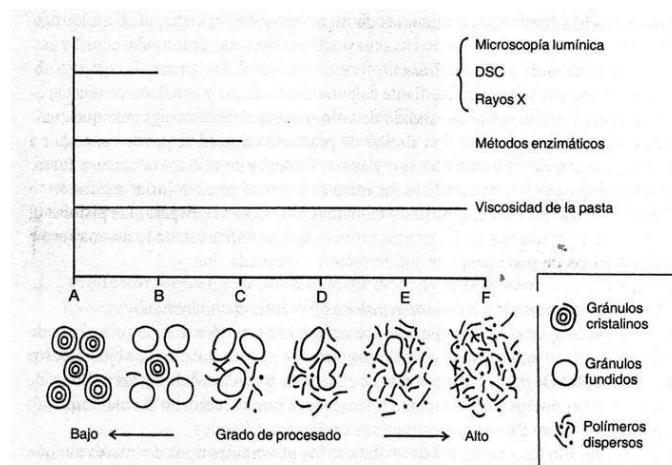
El grado de cocción estará relacionado no sólo con la susceptibilidad a la hidrólisis por las amilasas, sino también al grado de ruptura del gránulo de almidón. Las características reológicas de la dispersión estarán determinadas por la proporción de sólidos solubles y restos de gránulos hinchados, por lo que se puede decir que el concepto de “grado de cocción” resulta ser más amplio que el utilizado en nutrición (González y col., 2002). Por esto, se puede considerar como indicadores válidos del grado de cocción, el índice de solubilidad, el índice de hidratación y las curvas de viscosidad, en productos de cereales extrudidos (González, et al. 2002).

La transformación del almidón, es la base de la producción de cereales precocidos por extrusión, que permite la expansión y la formación de una nueva estructura, contribuyendo a la estabilidad del producto. Los cambios producidos en los materiales amiláceos durante la extrusión han sido extensamente

discutidos y la complejidad de las transformaciones producidas puede ser analizada por diferentes métodos de acuerdo a la severidad del tratamiento aplicado como puede observarse en la Figura 1.8 (Robutti y col., 2002; González y col., 1986, 1987; Kokini y col., 1992b; Mason y col., 1986).

Los distintos tipos de productos a base de cereales precocidos por extrusión, se pueden agrupar en dos grandes grupos:

- los productos expandidos, utilizados para elaborar “snacks”
- las harinas precocidas para preparar dispersiones (polenta, papillas y sopas cremas).



**Figura 1.8.** Diagrama de las formas físicas del almidón y los métodos de evaluación.

Durante el proceso de extrusión, las proteínas se desnaturalizan y disminuye su solubilidad debido a la agregación. Algunos enlaces se rompen por el aumento de la temperatura y de la fricción, formando nuevas estructuras. Al enfriarse se forman enlaces no covalentes y puentes disulfuro y si el contenido de humedad es lo suficientemente bajo, las zonas amorfas se transforman en cristalinas (Pérez-Navarrete y col., 2006).

En el caso de los lípidos, cuando están libres (no complejoado con otros componentes), actúan como lubricantes, reduciendo la conversión de energía mecánica en el extrusor, así como la expansión. Por esta razón, es importante controlar este componente, ya que, una pequeña variación del contenido de lípidos puede afectar drásticamente el producto. La grasa también puede debilitar la estructura celular, causando fusión y porosidad (Enríquez, 2004; Harper, 1989). Los azúcares, por lo general, actúan como lubricantes y disminuyen la expansión (Enríquez, 2004).

La fibra dietética también sufre cambios. En primer lugar, los cambios propios del almidón y formas resistentes al ataque enzimático, que *in vivo* no podrán ser digeridos y son medidos como fibra dietética. En segundo lugar, la degradación de la fibra dietética a fracciones de bajo peso molecular podría disminuir su contenido y así reducir sus beneficios. En tercer lugar, la degradación de macromoléculas de fibra, al aumentar su solubilidad puede cambiar sus efectos fisiológicos (Pérez-Navarrete y col., 2006).

Los atributos sensoriales de los extrudidos están fuertemente definidos por las variables del proceso y por las características del material crudo (Chen y col., 1991).

#### **1.7.5. Métodos de evaluación del material extrudido**

Para evaluar un producto extrudido, se pueden analizar características y propiedades tales como la expansión, el consumo específico de energía mecánica, el volumen específico, la susceptibilidad enzimática y la evaluación sensorial de la dureza.

Una de las propiedades más importantes de los productos extrudidos es la textura, la cual estará muy relacionada a la expansión. La expansión del producto ocurre en las direcciones longitudinal y radial, pero se ha demostrado que la expansión radial es la más simple de determinar y refleja la expansión global (Maroulis, 2004). El volumen específico surge de relacionar el diámetro, la longitud y el peso de los productos de extrusión.

Para los productos expandidos, el consumo específico de energía mecánica (CEEM) es un buen indicador del grado de cocción, ya que representa la energía mecánica entregada al material. A mayor CEEM, mayor será la intensidad de las transformaciones del almidón. Sin embargo, a medida que es mayor la destrucción de la estructura cristalina y granular, aumenta el grado de cocción, la expansión crece hasta un valor máximo, a partir del cual ésta disminuye, como consecuencia de la disminución de la elasticidad del "melt". La temperatura también se relaciona directamente con el grado de cocción, y por ende la expansión mostrará un máximo con la temperatura. En cuanto a la dureza sensorial, disminuye con el aumento de la temperatura, mientras que aumenta con el aumento de la humedad por lo que se relaciona en forma inversa con el grado de cocción. Por el contrario el grado de cocción se relaciona en forma directa con la susceptibilidad enzimática (González y col., 2002).

#### **1.7.6. Métodos de evaluación de las harinas precocidas**

Para la evaluación de las harinas precocidas se estudian las características y propiedades de la solubilidad en agua, la absorción en agua y la respuesta amilográfica (en el amilograma tiene especial importancia la retrogradación). De



todas estas respuestas, la solubilidad es la que permite interpretar con mayor claridad los cambios producidos y está inversamente relacionada con la absorción de agua (González y col., 1986), mientras que para utilizar la respuesta amilográfica, es necesario tener en cuenta toda la curva. No obstante, la consistencia final (retrogradación), puede considerarse un buen indicador del grado de cocción.

La viscosidad de las dispersiones está influenciada por las propiedades hidrodinámicas de sus componentes, por ejemplo, el tamaño y la forma de las partículas. Éstas a su vez son afectadas por el pH, fuerza iónica y los tratamientos durante el procesamiento, que alteran la conformación, la estructura, el grado de agregación, la hidratación y el hinchamiento (Pérez y col., 2008).

## **2. Objetivo General**

El grano de sorgo presenta una composición química similar a la del maíz, por lo que la tecnología de procesamiento para la obtención de productos a base de maíz es aplicable al sorgo. Con la finalidad de explotar eficientemente su potencial como materia prima en la elaboración de diversos productos se plantea utilizar el proceso de extrusión para la obtención de harinas pre-gelatinizadas y productos expandidos. Por lo tanto se propone como objetivo general: Evaluar los efectos de las condiciones de extrusión en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de productos extrudidos de sorgo integral de bajo contenido de taninos.

### **2.1. Objetivos Específicos**

1-Estudiar el efecto de las condiciones del proceso de extrusión en las características físicas de expandidos de sorgo integral de bajo contenido de taninos.

2- Estudiar el efecto de las condiciones del proceso de extrusión en las características funcionales (propiedades de hidratación) de harinas extrudidas de sorgo integral de bajo contenido de taninos.

3- Estudiar el efecto de las condiciones del proceso de extrusión en características químicas selectas (contenido de fitatos, polifenoles, actividad antioxidante) de harinas extrudidas de sorgo integral de bajo contenido de taninos.

4- Seleccionar las condiciones de extrusión apropiadas para obtener un producto de sorgo integral expandido.

5- Estudiar algunas características nutricionales del producto de sorgo integral extrudido obtenido.

### **3. Materiales y Métodos**

#### **3.1. Materias primas**

Los granos de sorgo con bajo contenido de taninos fueron gentilmente provistos por AMYLUM S.A, ciudad de Oncativo, Córdoba.

##### **3.1.1. Determinación de la composición centesimal de la materia prima**

La composición centesimal se determinó de acuerdo con los métodos de la American Association of Cereal Chemists (AOAC, 2002). Se determinó: humedad, extracto etéreo, proteínas (el factor para la conversión de nitrógeno a proteína utilizado fue 6.25), cenizas y fibra dietaria. Todas las determinaciones fueron realizadas por duplicado.

##### **3.1.2. Método para clasificar sorgos según el contenido de taninos condensados**

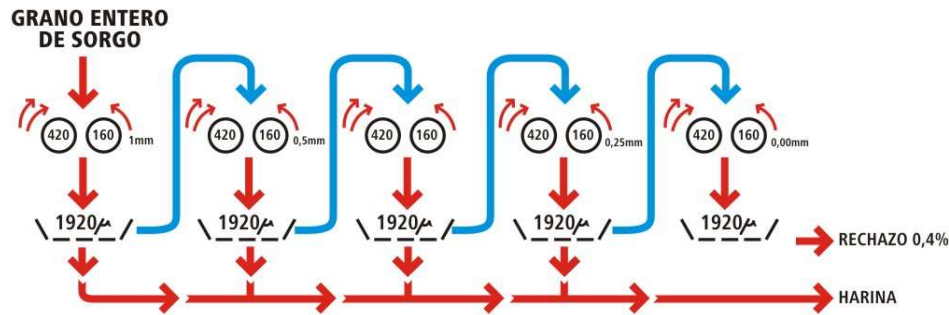
Determinación de granos con taninos condensados: “Prueba del blanqueo con cloro” (Chloro bleach test con base álcali), disolver 5g de hidróxido de sodio en 100 ml de solución de hipoclorito de sodio al 3,5%. Colocar 100g de sorgo entero en un vaso de precipitado. Agregar solución de blanqueo hasta cubrir los granos de sorgo y tapar con papel de aluminio. Dejar en contacto a temperatura ambiente (20°C a 30°C) por veinte 20 minutos. Agitar el contenido del vaso cada 5 minutos aproximadamente. Vaciar el contenido del vaso en un colador descartando la solución de blanqueo. Enjuagar los granos de sorgo con agua corriente. Volcar, los granos enjuagados en el colador, sobre una toalla de papel

y secar por encima con otra toalla. Contar los granos oscurecidos (granos con tanino). Los granos sin tanino son los que se han blanqueado por completo o están marrones en alguna parte de la superficie. Se efectúa el conteo de granos enteros que se hayan identificado con presencia de taninos condensados y se determina su porcentaje en la muestra, en relación con la cantidad de granos enteros totales de la misma.

### **3.1.3. Diagrama de Molienda de los granos de sorgo**

El diagrama de molienda se muestra en la Figura 3.1 y se describe a continuación. Los granos de sorgo integral con bajo contenido de taninos fueron molidos con un molino de rolos marca Buhler MIAG (BUA AG, Uzwil, Suiza), con rolos estriados medios, cuyo diferencial de velocidad fue de 2,5 y sus velocidades respectivas de 420 y 160 rpm, mientras que la velocidad del cilindro de alimentación fue de 60 rpm.

Se utilizó una progresiva reducción de los espaciamientos entre rodillos de 1, 0,5 0,25 y 0 mm sucesivamente (Figura 3.1). Las harinas obtenidas en cada molienda se tamizaron a través de una malla de 1920  $\mu\text{m}$  y la fracción retenida fue nuevamente molida con los rolos separados por las distancias mencionadas. Finalmente, se obtuvo rechazo de 0,4% que se incorporó a la harina integral obtenida con una granulometría menor a 1920  $\mu\text{m}$ . De este modo, se obtuvo una harina integral, que incluyó todos los componentes del grano: endospermo, pericarpio y germen, con granulometría apropiada para la extrusión y sin producción de residuos. Esta harina presentó una humedad de 13.8%.



**Figura 3.1.** Diagrama de molienda para obtener la materia prima para la extrusión.

## 3.2. Extrusión

### 3.2.1. Diseño experimental

Para analizar los efectos de las variables de extrusión sobre las características fisicoquímicas y texturales del producto expandido, se utilizó la metodología de superficie de respuesta, tomando como variables independientes (o factores) a la humedad de alimentación (H) (14, 16,5 y 19%) y la temperatura de extrusión (T) (164, 182 y 200°C), las que se variaron de acuerdo a un diseño experimental de tipo  $3^2$ , con 3 puntos centrales, resultando 11 experiencias con un triplicado del punto central.

La T y la H son los 2 factores más relevantes en la extrusión de cereales (González y col., 1987) y fueron las variables independientes seleccionadas para este estudio. Los niveles extremos seleccionados para estas variables fueron: 14-19 para la humedad (%), y 164-200 para la temperatura (°C).

En la Tabla N°3.1, pueden observarse los niveles de humedad y temperatura correspondientes al mencionado diseño.

**Tabla 3.1.** Niveles de Humedad y Temperatura correspondientes al Diseño Experimental.

TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)		
	14	16,5	19
164	X	X	X
182	X	XXX	X
200	X	X	X

### 3.2.2. Ensayos de extrusión

En todos los ensayos, las muestras se prepararon y acondicionaron 1 hora antes del proceso de extrusión, llevándolas al nivel de humedad establecido en el diseño experimental. Para esto se utilizó un mezclador planetario Brabender P 600 (Alemania) a una velocidad de rotación de 100 rpm, agregando el contenido de agua necesaria y agitando durante un 1 min.

En la operación de extrusión, para todas las condiciones, se utilizó un extrusor monotornillo Brabender 20 DN, con tornillo de relación de compresión 4:1, boquilla de 3 mm de diámetro y 20 mm de longitud y una velocidad de rotación de 150 rpm. La temperatura seleccionada de acuerdo al diseño se mantuvo mediante calefactores. Se midió la temperatura en el cañón y en la boquilla, se registró el torque ejercido sobre el eje del motor. Se obtuvieron los valores de caudal másico (g/min.) y torque en unidades Brabender (UB).

En todos los casos, una parte de cada muestra extrudida se cortó en trozos de aproximadamente 10 cm y se llevó a 6% de humedad en estufa a 60°C. Posteriormente, se guardaron en forma hermética en recipientes de plástico con

una actividad de agua apropiada para mantener dicha humedad, para luego realizar el análisis sensorial, la determinación de expansión, volumen específico y resistencia mecánica. El resto de la muestra se separó y molió para ser utilizado en los ensayos de hidratación y características de las dispersiones de harinas precocidas y sus respectivas evaluaciones nutricionales. Para ello, las muestras extrudidas fueron molidas en un molino de martillos Retsch-Muhle (Alemania), con sucesivas mallas de 2, 0.5 y 0.25 mm. Los productos fueron almacenados en bolsas de polietileno hasta su análisis.

**3.2.3. Determinación del Consumo específico de energía mecánica (CEEM).** Se calculó de acuerdo a González y col. (2002), a partir del torque que se genera en el tornillo extrusor utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{CEEM} = KxTxN/ Qs$$

Donde K: constante=  $61,3 \cdot 10^{-3} \text{ J g}^{-1}$ ; T: torque en Unidades Brabender (lectura de registro del gráfico); N: rpm del tornillo extrusor ( $\text{min}^{-1}$ ) y QS: Caudal másico referido a la humedad de alimentación. El Qs Se determinó pesando la muestra que se extrude en 1 min y refiriéndola a la humedad de alimentación.

### **3.3. Evaluación de las muestras extrudidas**

#### **3.3.1. Evaluaciones fisicoquímicas de productos extrudidos**

Para la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales: se utilizaron distintas técnicas según el producto a evaluar (expandidos o harinas precocidas):



**3.3.1.1. Índice de expansión (E).** Se realizó de acuerdo a González y col. (2002). Los diámetros fueron medidos con un calibre Vernier (sensibilidad 0,02 mm) en 5 zonas distintas del mismo trozo. La expansión se calculó como la relación entre el diámetro medio del producto y el diámetro de la boquilla según:

$$E = D/d$$

Donde D: es el diámetro promedio del material extrudido y d: es el diámetro de la boquilla del extrusor.

**3.3.1.2. Volumen específico (VE).** Se calculó de acuerdo a González y col. (2002), secando a 105 °C hasta pesada constante, trozos de 10 cm de largo aproximadamente y se calculó en relación al diámetro, longitud y peso.

$$Ve (g/cm^3) = (\pi \times d^2 \times 10) / (4 \times P_s)$$

Donde:

d: diámetro del expandido.

Ps: Peso seco de la muestra.

**3.3.1.3. Evaluación de la dureza sensorial (DS).** La evaluación sensorial de la dureza se realizó con la participación de un panel entrenado (Pérez y col., 2008), considerando una escala de puntos del 1 (la muestra más blanda) al 9 (la muestra más dura) y otorgando la puntuación a cada muestra por consenso de los jueces, motivo por el cual no se realiza análisis de varianza.

**3.3.1.4. Dureza mecánica (DM).** Fue evaluada determinando la resistencia a la compresión del producto, utilizando una máquina universal Instron modelo

2519-105. Para ello, trozos de 5 cm de largo fueron comprimidos a una velocidad de avance de 1 cm/seg (imitando la masticación) y se utilizó un sensor de fuerza (Newton).

### **3.3.2. Evaluaciones fisicoquímicas de las harinas precocidas**

**3.3.2.1. Solubilidad en agua (S).** Se utilizó la técnica de Anderson y col. (1969) modificado por González y col. (2002), la cual consiste en dispersar 2,5 g de muestra en 50 ml de agua destilada en un tubo de ensayo con agitación intermitente durante 30 minutos y luego centrifugar a 2000xg. En la fase sobrenadante se determina los sólidos dispersos, evaporando en estufa a 105°C. La solubilidad se expresa como el porcentaje de los sólidos dispersados respecto a 100 g de harina, sobre base seca.

**3.3.2.2. Absorción de agua (AA).** Se utilizó un equipo Baumman, según la técnica originalmente propuesta por Torgensen y Toledo (1977) y utilizada normalmente en el laboratorio del ITA (González y col., 1995). Este método consiste en medir la captación libre de agua producida por la muestra, en función del tiempo. Para lo cual, se colocan sobre un papel de filtro, 50 mg de la muestra (previamente molida), uniformemente distribuida. El papel con la muestra se apoya cuidadosamente sobre un vidrio poroso, el cual se encuentra sobre un receptáculo inundado de agua destilada. El nivel de agua del sistema receptáculo-vidrio poroso está conectado a una pipeta (a través de un tubo desde el fondo del receptáculo) en posición horizontal que permite ir midiendo el agua absorbida.

**3.3.2.3. Respuesta Amilográfica.** Se utilizó un Amilógrafo de Brabender (Duisburg-Alemania) con el cabezal de 250 gcm, de acuerdo al procedimiento utilizado en el laboratorio del ITA (González y col., 1987). La dispersión se realizó al 10% de sólidos en base seca. Antes de iniciar el calentamiento, se mantuvo la suspensión en agitación a máxima velocidad durante 5 minutos, para asegurar hidratación completa de las partículas. Luego la temperatura se elevó desde 30°C hasta 95°C, manteniéndose esta temperatura por 20 minutos, y se enfrió hasta 50°C. Tanto el calentamiento como el enfriamiento, se realizaron a razón de 1,5°C por minuto. El valor de la consistencia en cada punto, se expresó en Unidades Brabender (UB). Para harina sin cocción, se determinó la temperatura de empaste, la temperatura y la viscosidad del pico amilográfico, la viscosidad al final de la cocción y al final del enfriamiento (retrogradación) y para harinas precocidas, además de lo ya mencionado, se determinó la viscosidad inicial.

La respuesta amilográfica se evaluará determinando:

- ✓ Ci: consistencia inicial a 30°C
- ✓ C95i: consistencia inicial a 95°C
- ✓ C95f: consistencia final a 95°C
- ✓ R: retrogradación

**3.3.2.4. Grado de gelatinización (G).** Se determinó de acuerdo al método de González y col. (1986), utilizando la enzima glucoamilasa y midiendo el porcentaje de gelatinización, que es la cantidad de almidón gelatinizado en la muestra expresada como un porcentaje del total del almidón. Es un indicador del grado de cocción.

**3.3.2.5. Observación microscópica.** Las muestras molidas fueron observadas microscópicamente utilizando un microscopio Leitz (Alemania) con luz polarizada para determinar la presencia de gránulos de almidón que conservan la estructura nativa (gránulos con la “cruz de malta”).

**3.3.2.6. Determinación del contenido de taninos (TA).** Se realizó mediante una modificación a la Norma Internacional para la Determinación de Taninos, Número 9648, ISO (1988). A 1 g de muestra, se le agregaron 20 ml de solución de dimetilformamida, se agitó durante 60 minutos y se centrifugó. Se tomó 1 ml, se le agregaron 6 ml de agua desionizada y 1 ml de amoníaco. En paralelo se procedió nuevamente a tomar 1 ml del líquido original y se le agregaron 5 ml de agua, 1 ml de solución de citrato férrico de amonio y 1 ml de amoníaco. Se agitó y dejó reposar. Estas soluciones se leyeron en espectrofotómetro a 525 nm de longitud de onda. Como estándar se utilizó ácido tánico.

**3.3.2.7. Determinación del contenido de fitatos (AF).** Se empleó el método AOAC (1993) que se basa en la extracción del ácido fítico en medio ácido, seguido por una separación a través de una resina aniónica y lectura colorimétrica del contenido de fósforo usando el reactivo de ácido fósfolíbdico.

**3.3.2.8. Determinación del contenido de polifenoles (PF).** Se utilizó la técnica de Folin-Ciocalteau (Singleton y col., 1999) usando una curva patrón de

ácido gálico en un rango de concentración de 20 – 500 g/ml. Los resultados se expresaron como equivalentes de ácido gálico (EAG) g/100g de muestra seca.

**3.3.2.9. Determinación de la capacidad antioxidante (CAO).** Para estimar la actividad antioxidante, se utilizó el método de inhibición del radical catión  $ABTS^+$  propuesto por Pukalskas y col. (2002). En una primera etapa, se generó el radical catión  $ABTS^{+·}$ , haciendo reaccionar 10ml de ABTS (2,2'-azinobis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (Sigma-A1888) 2mM con 40 $\mu$ l de persulfato de potasio ( $K_2S_2O_8$ ) 70mM. Luego se dejó reposar a temperatura ambiente y en oscuridad durante 16-17 horas. Posteriormente, se realizó una dilución del reactivo con PBS de tal manera que la absorbancia fuese de  $0.800 \pm 0.030$  y se llevó a cabo la reacción redox entre el  $ABTS^+$  y el agente reductor, el cual puede ser la muestra o el estándar. Al reducirse, el radical catión de color azul-verdoso ( $ABTS^+$ ) se decolora. Este fenómeno es registrado a una longitud de onda de 734 nm empleando para ello un espectrofotómetro (Milton Roy-Genesys, Rochester USA).

### **3.3.3. Evaluaciones nutricionales de las harinas integrales**

Una muestra extrudida fue seleccionada para realizar las evaluaciones nutricionales que se detallan a continuación.

**3.3.3.1. Análisis de la composición centesimal.** Se siguieron las técnicas de la AOAC (2002) determinando: humedad, extracto etéreo, proteínas, cenizas y

fibra dietaria. El contenido de proteína se expresó como nitrógeno multiplicado por un factor en función del tipo de cereales y para el caso del sorgo es 6,25.

**3.3.3.2. Determinación del contenido de Lisina disponible.** Se utilizó el método de Carpenter modificado por Booth (1971) que se basa en la reacción de los  $\epsilon$ -aminos con 2-4 dinitro-fluor-benceno, previa a la hidrólisis proteica. A una cantidad de muestra que contiene 2.4 mg de nitrógeno, se le añadió 0.32 ml de  $\text{NaHCO}_3$  8% y 0.492 ml de una solución de 2-4 dinitro-fluoro-benceno (0,3 ml en 12 ml de etanol). La mezcla se agitó durante 2 h en baño a temperatura ambiente. El exceso de disolvente se evaporó dejándolo 24 hs sin tapa. Luego se le añadieron 8 ml de HCl 8M, y la mezcla se autoclavó 1 h a 1 atm. El contenido fue filtrado y se tomaron 2 ml de hidrolizados para dos tubos (A y B). El contenido del tubo B se extrajo con 5 ml de éter sulfúrico, el éter residual se evaporó en un baño de agua a 80°C, y se le agregó 1 gota de fenolftaleína y NaOH 12%, hasta coloración rosa. A continuación, se adicionaron 2 ml de buffer de carbonato (19,5 g  $\text{NaHCO}_3$  + 1 g  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en 250 ml de agua) y cinco gotas de metil-cloroformiato. A continuación, se añadieron 0,75 ml de HCl concentrado, la solución se extrajo cuatro veces con 5 ml de éter sulfúrico, y se transfirió el contenido a un matraz de 10 ml. El tubo A se extrajo 3 veces con éter etílico, luego se colocó en baño a 80°C, se enfrió y se llevó a 10 ml con HCl 1 N. Se leyó la absorbancia a 435 nm utilizando un espectrofotómetro (Thermospectronic Génesis 10uV, Madison, WI, EE.UU.). La Lys se determinó como dinitrofluorobenceno lisina:

Lisina g / 16 g de N =  $(L \times 250 \times 0.42 \times 100) / (E \times \text{alícuota} \times M \times \% \text{ de proteína en base seca})$

Donde L: es la absorbancia A-B, 0,42 es el factor de conversión de la dinitrofluorobenceno-lisina, E: es el coeficiente de extinción molar, M: es el peso de la muestra y la alícuota, 2 ml.

**3.3.3.3. Estudio del contenido de minerales.** Se determinó el contenido de Fe y Zn por espectrometría de absorción atómica; de P utilizando la técnica colorimétrica que usa el reactivo fosfomolibdato de amonio (AOAC 2002).

**3.3.3.4. Disponibilidad de minerales.** Para la determinación de la disponibilidad de Fe y Zn se utilizó la técnica de dializabilidad de minerales de Miller y col. (1981) modificada por Wolfgor y col. (2002) ajuste por pH (Drago y col., 2005).

La disponibilidad potencial de Fe y Zn se calculó como la cantidad del mineral (M) dializado expresada como porcentaje del contenido de dicho mineral total en la muestra:

$$\% \text{ DM dializado} = (\text{mg M dializado} / \text{mg M en la muestra}) \times 100$$

El aporte potencial se calculó considerando una ración de 25 g y utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Aporte potencial} = \text{concentración M} \times \% \text{DM} \times \text{g ración}$$

**3.3.3.5. Digestibilidad proteica.** Se utilizó la técnica *in vitro* propuesta por Rudloff y Lönnerdal (1992).

### **3.4. Análisis estadístico de los resultados**

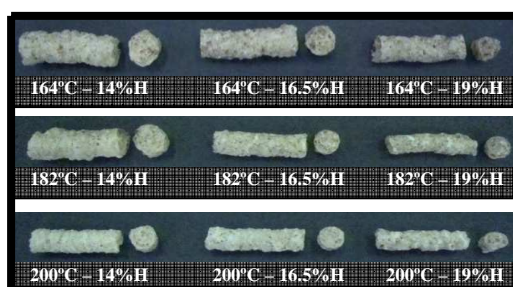
Todas las determinaciones de las propiedades fisicoquímicas se realizaron por duplicado, y se informaron los promedios correspondientes. Para la realización del análisis de variancia y para analizar el diseño experimental y obtener las superficies de respuesta, se utilizó el software estadístico Statgraphics plus 3.0



## 4. Resultados y Discusión

### 4.1. Efectos de las variables de extrusión sobre las características fisicoquímicas y texturales de los productos expandidos

En la Figura 4.1 se muestran los productos de sorgo expandidos obtenidos por extrusión. Se pueden apreciar las distintas características de los mismos, observando que el material alcanzó estados muy expandidos hasta otros más compactos, según fueron los niveles de H y T del proceso.



**Figura 4.1.** Fotografía de los productos de sorgo integral extrudidos.

Los valores obtenidos en las evaluaciones físicas y sensoriales realizadas para las distintas condiciones de extrusión de acuerdo al diseño experimental se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Valores obtenidos para el consumo específico de energía mecánica (CEEM), expansión (E), volumen específico (VE), dureza sensorial (DS) y dureza mecánica (DM) en las distintas condiciones de extrusión.

Temperatura (°C)	Humedad (%)	CEEM (J/g)	E	VE (cm <sup>3</sup> /g)	DS	DM (kgf)
164	14	1006,98	3,36	8,25	6	33,2
	16,5	987,55	3,17	6,12	8	35,43
	19	965,69	2,83	4,77	9	40,64
182	14	951,75	3,33	9,84	4	28,9
	16,5	888,04	2,93	7,49	6	34,48
	16,5	934,74	3,15	7,63	5	33,24
	16,5	955,93	3,11	7,48	5	32,63
	19	837,23	2,65	5,99	7	38,84
200	14	939,29	2,86	10,41	1	26,59
	16,5	835,63	2,75	9,34	3	32,33
	19	760,98	2,29	6,26	5	33,45

#### 4.1.1. Consumo Específico de Energía Mecánica (CEEM)

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.2 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para el CEEM, en la Tabla 4.3. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre CEEM.

En la Figura 4.2 se muestra la superficie respuesta para el CEEM producido durante la extrusión de sorgo integral.

**Tabla 4.2.** Análisis de la Varianza para el Consumo Específico De Energía Mecánica.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	38107,5	1	38107,5	36,57	<b>0,0263</b>
Humedad	13092,1	1	13092,1	12,56	0,0712
TT	467,411	1	467,411	0,45	0,5720
HT	9107,16	1	9107,16	8,74	0,0979
HH	31,3806	1	31,3806	0,03	0,8782
Falta de ajuste	1947,11	3	649,035	0,62	<b>0,6643</b>
Error Puro	2084,24	2	1042,12		
Total (corr.)	64805,5	10			

R-cuadrado = 93,7793 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 87,5586 por ciento  
Error Estándar de Est. = 32,2819  
Error absoluto de la media = 16,1326  
Estadístico Durbin-Watson = 2,14385 (P=0,4068)  
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,0877881

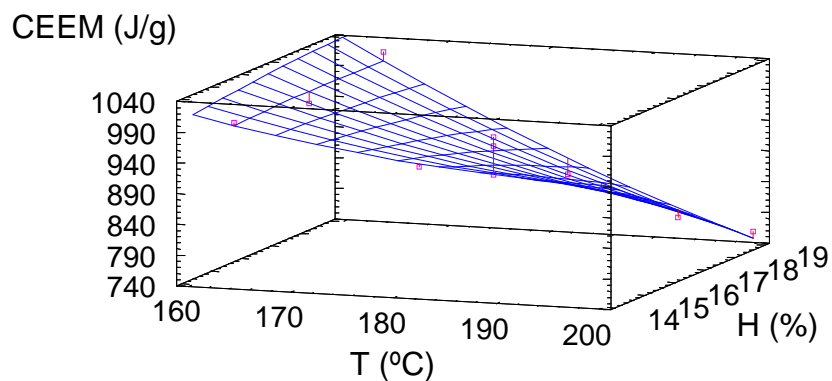
**Tabla 4.3.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para el Consumo Específico De Energía Mecánica.

Constante	= 78,996
Temperatura	= -2,1919
Humedad	= 192,882
TT	= 0,0419236
TH	= -1,06035
HH	= -0,563125

Los resultados indicaron que el término significativo fue el correspondiente a T, aunque como se observa en la superficie respuesta correspondiente al CEEM, el efecto de H no fue despreciable. Se puede observar que el CEEM disminuyó tanto con el aumento de la T como de la H, lo cual es coherente con lo observado en otros trabajos (González y col., 2002). Esto está relacionado con la fricción interna del material durante la extrusión, la cual disminuye con el aumento tanto de la H como de la T.

El rango de T utilizado fue suficientemente alto para mostrar efectos sobre la fricción, es decir un aumento de T disminuyó el grado de fricción. El hecho de que al

más bajo nivel de T evaluado, el efecto de la H pareciera no afectar al CEEM podría atribuirse a que, a diferencia de lo que ocurre con sémolas de maíz descascarado y degerminado, la presencia de germen y pericarpio en las muestras de sorgo atenuarían la reducción de fricción que provocaría un aumento de H.



**Figura 4.2.** Superficie de respuesta para el Consumo Específico De Energía Mecánica en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

#### 4.1.2. Índice de Expansión (E)

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.4 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la expansión, en la Tabla 4.5. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la expansión.

En la Figura 4.3 se muestra la superficie respuesta para la expansión de los productos de sorgo integral.

En el análisis de ANOVA se observa que los términos lineales de las dos variables (T y H) fueron los más significativos. La pequeña curvatura que se observa en la superficie respuesta debe atribuirse a que la significación de los términos cuadráticos si bien es bajo, no es totalmente despreciable.

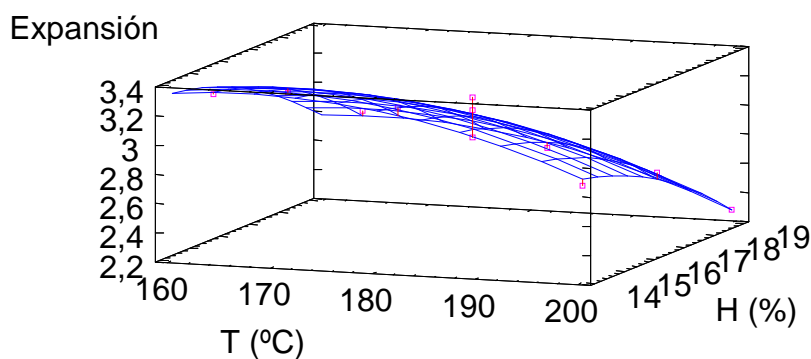
**Tabla 4.4.** Análisis de la Varianza para la Expansión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	0,355072	1	0,355072	18,08	<b>0,0511</b>
Humedad	0,528779	1	0,528779	26,93	<b>0,0352</b>
TT	0,0491766	1	0,0491766	2,50	0,2543
TH	0,000668222	1	0,000668222	0,03	0,8706
HH	0,0280505	1	0,0280505	1,43	0,3545
Falta de ajuste	0,0102748	3	0,00342495	0,17	<b>0,9056</b>
Error Puro	0,0392692	2	0,0196346		
Total (corr.)	1,03853	10			

R-cuadrado = 95,2294 por ciento  
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 90,4588 por ciento  
 Error Estándar de Est. = 0,140124  
 Error absoluto de la media = 0,0500233  
 Estadístico Durbin-Watson = 1,38531 (P=0,1174)  
 Autocorrelación residual Lag 1 = 0,287269

**Tabla 4.5.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Expansión.

Constante	= -12,1858
Temperatura	= 0,147751
Humedad	= 0,489123
TT	= -0,000430019
TH	= -0,000287222
HH	= -0,0168362



**Figura 4.3.** Superficie respuesta para la Expansión de los productos de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

La tendencia mostrada por la superficie está de acuerdo a lo esperado (González y col., 2002; Pérez y col., 2006), es decir, E disminuye con el aumento tanto de T como de H. El mayor valor se obtuvo a 164°C y 14%. Esto se puede

explicar teniendo en cuenta que a los menores valores de H y de T, la componente elástica del fluido o “melt”, es mayor que para los valores más elevados de esas variables y por lo tanto mayor es la expansión.

#### 4.1.3. Volumen Específico (VE)

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.6 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para el volumen específico, en la Tabla 4.7. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p>0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre el volumen específico.

En la Figura 4.4 se muestra la superficie respuesta para el volumen específico de los productos de sorgo integral.

La tendencia observada es esperable y similar a la correspondiente a sémola de maíz degerminado (González y col., 2002), el VE aumenta con la T y disminuye con el aumento de la H.

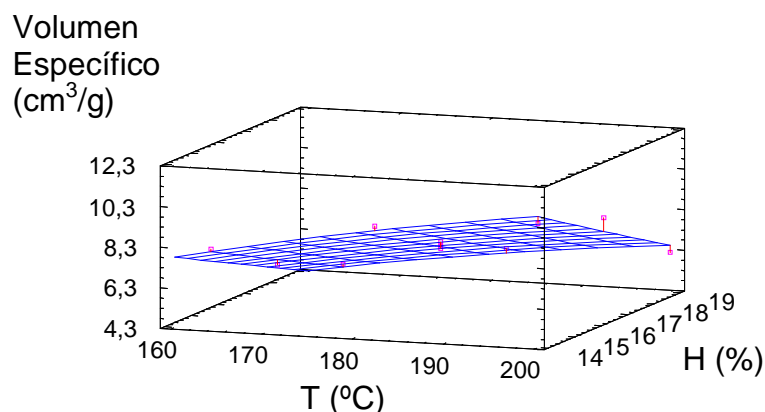
**Tabla 4.6. Análisis de la Varianza para el Volumen Específico.**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	7,86203	1	7,86203	282,82	<b>0,0035</b>
Humedad	21,9746	1	21,9746	790,48	<b>0,0013</b>
TT	0,0657567	1	0,0657567	2,37	0,2639
TH	0,110457	1	0,110457	3,97	0,1844
HH	0,0016524	1	0,0016524	0,06	0,8301
Falta de ajuste	0,962107	3	0,320702	11,54	<b>0,0808</b>
Error Puro	0,0555982	2	0,0277991		
Total (corr.)	31,0314	10			

R-cuadrado = 96,7204 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 93,4408 por ciento  
Error Estándar de Est. = 0,166731  
Error absoluto de la media = 0,255667  
Estadístico Durbin-Watson = 2,24226 (P=0,3336)  
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,237215

**Tabla 4.7.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para el Volumen Específico.

Constante	= -17,7229
Temperatura	= 0,305526
Humedad	= -0,228263
TT	= -0,000497255
TH	= -0,00369278
HH	= 0,00408632



**Figura 4.4.** Superficie respuesta para el Volumen Específico de los productos de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

#### 4.1.4. Evaluación de la Dureza Sensorial (DS)

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.8 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la dureza sensorial, en la Tabla 4.9. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la dureza sensorial.

En la Figura 4.5 se muestra la superficie respuesta para la dureza sensorial de los productos de sorgo integral.

En relación a la evaluación sensorial, los resultados de la DS para el ANOVA y los coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del

modelo de segundo orden, permiten deducir que sólo los efectos de T y H en sus términos lineales fueron significativos.

Se puede observar que la relación entre la DS y cada una de las dos variables estudiadas, es opuesta. La DS aumenta con el aumento de H (relación directa) mientras que disminuye con el aumento de T (relación inversa). Y tal como se observa en la Figura 4.5 la muestra de mayor dureza es obtenida a 164°C y 19% H y por su parte, la más blanda es la obtenida a 200°C y 14%H.

**Tabla 4.8.** Análisis de la Varianza para la Dureza Sensorial.

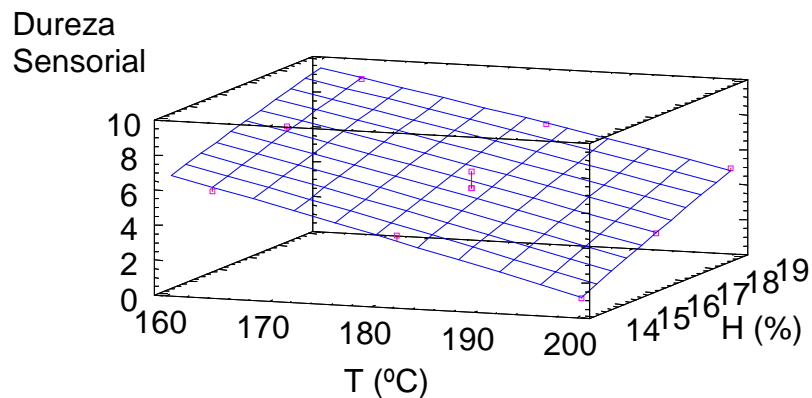
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	32,6667	1	32,6667	98,00	<b>0,0101</b>
Humedad	16,6667	1	16,6667	50,00	<b>0,0194</b>
TT	0,00701754	1	0,00701754	0,02	0,8979
TH	0,25	1	0,25	0,75	0,4778
HH	0,00701754	1	0,00701754	0,02	0,8979
Falta de ajuste	0,276316	3	0,0921053	0,28	<b>0,8414</b>
Error Puro	0,666667	2	0,333333		
Total (corr.)	50,5455	10			

R-cuadrado = 98,1344 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96,2688 por ciento  
Error Estándar de Est. = 0,57735  
Error absoluto de la media = 0,232057  
Estadístico Durbin-Watson = 2,62395 (P=0,1136)  
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,319665

**Tabla 4.9.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Dureza Sensorial.

Constante	= 27,0236
Temperatura	= -0,162167
Humedad	= -0,0665497
TT	= -0,000162443
TH	= 0,00555556
HH	= -0,00842105





**Figura 4.5.** Superficie respuesta para la Dureza Sensorial de los productos de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

#### 4.1.5. Dureza Mecánica (DM)

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.10 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la dureza mecánica, en la Tabla 4.11. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la dureza mecánica.

En la Figura 4.6 se muestra la superficie respuesta para dureza mecánica de los productos de sorgo integral, con tendencia similar a la observada para DS.

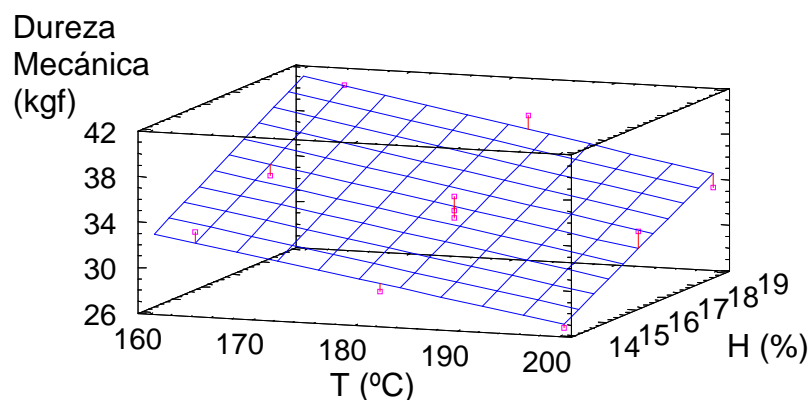
**Tabla 4.10.** Análisis de la Varianza para la Dureza Mecánica.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	47,6137	1	47,6137	53,63	<b>0,0181</b>
Humedad	97,8555	1	97,8555	110,21	<b>0,0090</b>
TT	0,000130069	1	0,000130069	0,00	0,9914
TH	0,0836174	1	0,0836174	0,09	0,7879
HH	0,000762062	1	0,000762062	0,00	0,9793
Falta de ajuste	7,87706	3	2,62569	2,96	<b>0,2628</b>
Error Puro	1,77573	2	0,887865		
Total (corr.)	155,207	10			

R-cuadrado = 93,7807 por ciento  
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 87,5614 por ciento  
 Error Estándar de Est. = 0,942266  
 Error absoluto de la media = 0,833855  
 Estadístico Durbin-Watson = 2,17565 (P=0,3827)  
 Autocorrelación residual Lag 1 = -0,171145

**Tabla 4.11.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Dureza Mecánica.

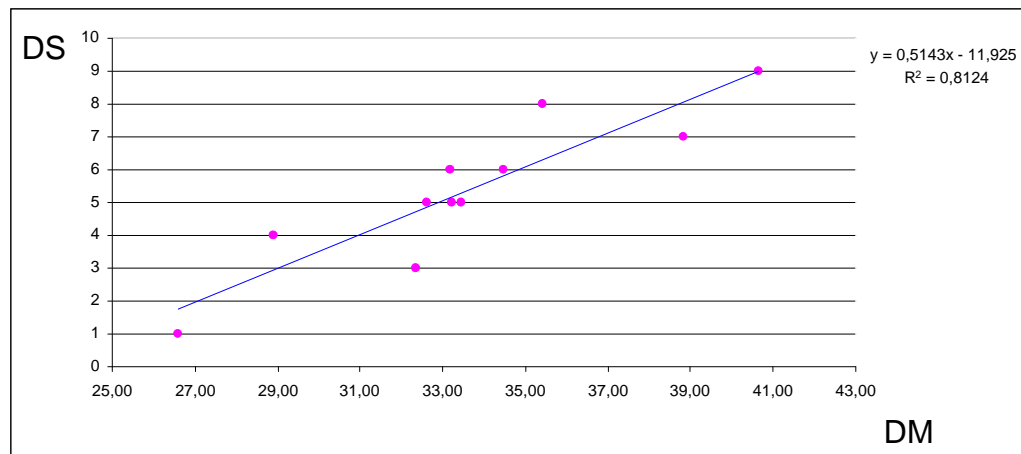
Constante	= 24,3178
Temperatura	= -0,0954374
Humedad	= 2,29172
TT	= -0,0000221155
TH	= -0,00321296
HH	= -0,00277504



**Figura 4.6.** Superficie respuesta para la Dureza Mecánica de los productos de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

Del análisis del ANOVA de los resultados para la DM se observó que sólo los efectos de T y H en sus términos lineales fueron significativos. Al igual que en DS, la relación entre la DM y cada una de las dos variables estudiadas, es opuesta (Figura 4.6). Similar tendencia fue encontrada por Lassa (2008), trabajando con mezclas maíz-soja y con el mismo extrusor.

La Figura 4.7, muestra la buena correlación entre las dos evaluaciones de la dureza, lo cual confirma que la técnica seleccionada para determinar la DM es adecuada.



**Figura 4.7.** Relación entre Dureza Mecánica y Dureza Sensorial.

#### **4.2. Efecto de las condiciones del proceso de extrusión en las características funcionales (propiedades de hidratación) de harinas extrudidas**

Antes de analizar el efecto de las variables T y H sobre las propiedades de hidratación, es importante recordar lo siguiente: la cocción por extrusión es un proceso termomecánico, por lo cual tanto la temperatura como las fuerzas cortantes, son los factores relevantes que afectan al grado de cocción alcanzado. La temperatura mínima necesaria para que se produzca la gelatinización o fusión de los cristallitos del almidón, está en reacción inversa a la humedad. No obstante, y aún para temperaturas superiores a esa mínima, sería posible encontrar gránulos de almidón con la cruz de malta, debido a que el mecanismo de transporte no es del tipo "flujo pistón" y habrá partículas que no alcanzan a completar el proceso de cocción. Esto explica la heterogeneidad de una muestra extrudida. En resumen, en una muestra extrudida es posible encontrar una mezcla compuesta de almidón nativo, gelatinizado o fundido y fragmentado (Politz y col., 1994; Kokini y col., 1992; Lai y Kokini, 1991).

Los valores obtenidos de los efectos de las distintas condiciones del proceso de extrusión sobre las propiedades de hidratación: Solubilidad (S), Absorción de Agua (AA), valores amilográficos (Consistencia inicial (Ci), Consistencia inicial a 95°C (C95i), Consistencia final a 95°C (C95f), Retrogradación (R)), Gelatinización (G) y Observación Microscópica de harinas extrudidas, se muestran en la Tabla 4.12.

**Tabla 4.12.** Valores obtenidos para la Solubilidad (S), Absorción de Agua (AA), Consistencia inicial (Ci), Consistencia inicial a 95°C (C95i), Consistencia final a 95°C (C95f), Retrogradación (R), Gelatinización (%G) y Observación Microscópica en las distintas condiciones de extrusión.

Temperatura (°C)	Humedad (%)	S (g%)	AA	Ci	C95i	C95f	R	%G	Obs. Microsc.
164	14	53,74	5,2	345	105	65	115	89,3	XX
	16,5	50,61	4,73	400	155	100	200	82,83	X
	19	42,71	4,35	410	240	210	340	84,24	X
182	14	54,59	4,97	340	120	90	110	89,76	XXX
	16,5	53,18	4,94	415	180	120	240	89,95	XXX
	16,5	51,28	5,07	420	180	120	225	88,89	XXX
	16,5	51,32	5,03	430	190	160	250	88,46	XXX
	19	46,85	4,59	450	217,5	185	210	93,29	XXX
200	14	54,68	5,28	380	160	110	210	92,55	XXXX
	16,5	53,34	5,1	465	200	160	285	93,29	XXXX
	19	52,57	4,98	440	192,5	167,5	300	93,9	XXX

### 4.2.1. Solubilidad en Agua (S)

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.13 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la solubilidad en agua, en la Tabla 4.14. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la solubilidad en agua.

En la Figura 4.8 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.9 los efectos principales, para la solubilidad en agua de las harinas extrudidas de sorgo integral.

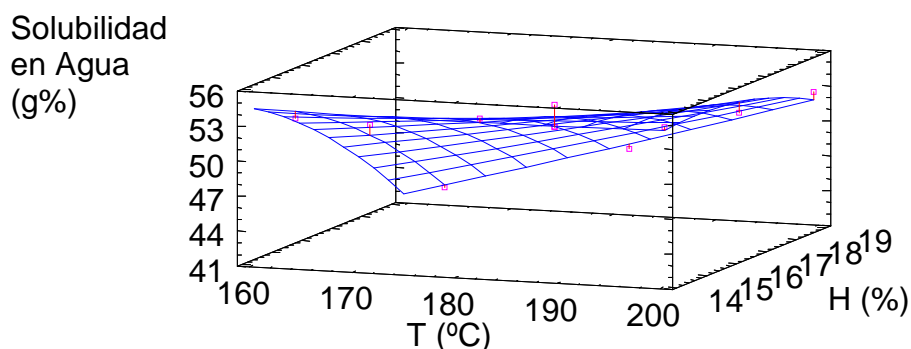
**Tabla 4.13.** Análisis de la Varianza para la Solubilidad en Agua.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	30,5415	1	30,5415	26,02	<b>0,0363</b>
Humedad	72,7658	1	72,7658	62,00	<b>0,0157</b>
TT	0,0436856	1	0,0436856	0,04	0,8648
TH	19,9092	1	19,9092	16,96	0,0542
HH	3,21548	1	3,21548	2,74	0,2397
Falta de ajuste	2,84929	3	0,949764	0,81	<b>0,5940</b>
Error Puro	2,34731	2	1,17365		
Total (corr.)	131,707	10			

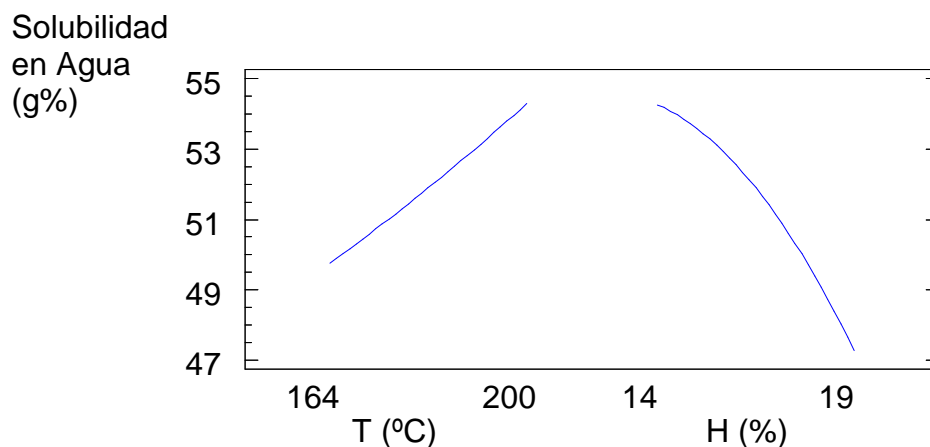
R-cuadrado = 96,0544 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92,1088 por ciento  
Error Estándar de Est. = 1,08335  
Error absoluto de la media = 0,61913  
Estadístico Durbin-Watson = 2,01032 (P=0,4895)  
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,0549229

**Tabla 4.14.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Solubilidad en Agua.

Constante	= 165,298
Temperatura	= -0,840215
Humedad	= -4,46753
TT	= 0,000405301
TH	= 0,0495774
HH	= -0,180259



**Figura 4.8.** Superficie respuesta para la Solubilidad en Agua de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



**Figura 4.9.** Efectos principales para la Solubilidad en Agua de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

En el análisis de ANOVA se observa sólo los efectos lineales de T y H fueron significativos, aunque la interacción TxH no fue despreciable (0,0542), lo cual permitiría explicar la distorsión del plano (Figura 4.8). La Figura 4.9 muestra que la S mantiene una relación inversa con la H, tal como se estudió en el trabajo realizado

por Martínez y Pau (1992), donde se realizó la extrusión de sorgo integral con tres diferentes contenidos de humedad (12, 15 y 18%). El aumento de la H produce una disminución importante en la S, este efecto fue más notable a baja T y poco significativo a alta T. Por otra parte, la S aumenta cuando aumenta T, aunque en este caso, ese aumento es menos notable a baja T. Esto indicaría que a baja H, la fricción producida es suficiente para generar la cocción de los gránulos de almidón independientemente de la T (en el rango evaluado), mientras que a alta H, el efecto térmico se hace evidente, y el GC aumenta con T. Esto sugiere que a baja H, predomina el efecto de fricción, mientras que a alta H, es el efecto térmico el predominante. Estos resultados son coherentes con aquellos obtenidos trabajando con sémolas provenientes de granos desgerminados y descascarados (González y col., 2002).

#### **4.2.2. Absorción de Agua (AA)**

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.15 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la absorción de agua, en la Tabla 4.16. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la absorción de agua.

En la Figura 4.10 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.11 los efectos principales, para la absorción de agua de las harinas extrudidas de sorgo integral.

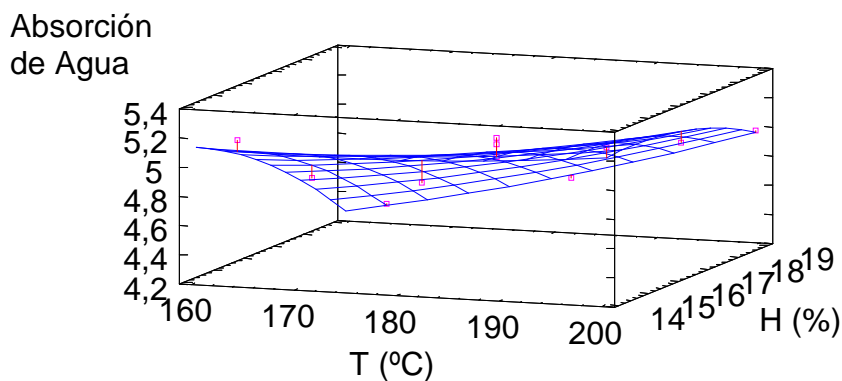
**Tabla 4.15.** Análisis de la Varianza para la Absorción de Agua.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	0,199117	1	0,199117	46,23	<b>0,0210</b>
Humedad	0,389387	1	0,389387	90,40	<b>0,0109</b>
TT	0,00472905	1	0,00472905	1,10	0,4047
TH	0,0755067	1	0,0755067	17,53	0,0526
HH	0,0215733	1	0,0215733	5,01	0,1546
Falta de ajuste	0,0574069	3	0,0191356	4,44	<b>0,1892</b>
Error Puro	0,00861466	2	0,00430733		
Total (corr.)	0,752549	10			

R-cuadrado = 91,2269 por ciento  
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 82,4539 por ciento  
 Error Estándar de Est. = 0,0656302  
 Error absoluto de la media = 0,0639834  
 Estadístico Durbin-Watson = 3,00171 (P=0,0197)  
 Autocorrelación residual Lag 1 = -0,540769

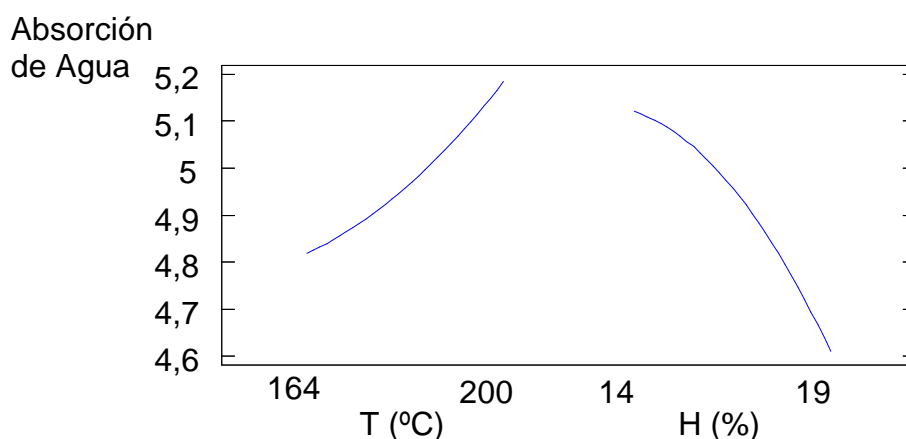
**Tabla 4.16.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Absorción de Agua.

Constante	= 14,3634
Temperatura	= -0,0887964
Humedad	= -0,170333
TT	= 0,000133351
TH	= 0,00305317
HH	= -0,0147649



**Figura 4.10.** Superficie respuesta para la Absorción de Agua de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



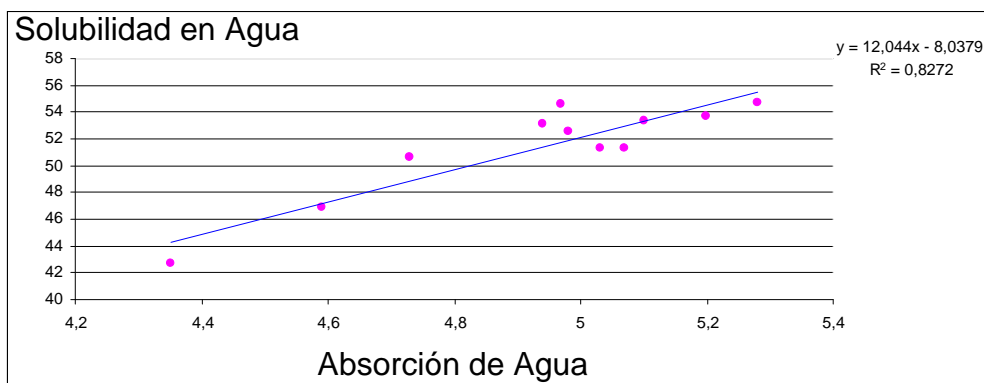


**Figura 4.11.** Efectos principales para la Absorción de Agua de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

Del análisis de ANOVA de los resultados para la AA puede observarse que sólo los términos lineales de H y de T son significativos, aunque el término cuadrático correspondiente  $T \times H$ , no es despreciable ( $p < 0,0526$ ), el cual sería responsable de la distorsión del plano (Figura 4.10). En la misma figura, la superficie muestra una tendencia similar a la correspondiente a la S y a través de la Figura 4.11 confirmamos que la AA también posee relación inversa con la H y que aumenta cuando aumenta la T, en concordancia con otros trabajos en los cuales la pérdida de estructura nativa no era completa (Haller, 2008).

Es sabido que cuando el GC no es elevado, la AA se relaciona directamente con la S, pero a partir de un cierto valor de GC, un incremento se traduce en una disminución de AA (González y col., 2002).

En la Figura 4.12 se muestra la relación directa existente entre S y AA, la cocción incompleta de estas muestras, queda confirmada también por los valores de %Gelatinización y por la observación microscópica.



**Figura 4.12.** Relación existente entre Solubilidad en Agua y Absorción de Agua de las harinas extrudidas de sorgo integral.

#### 4.2.3 Respuesta Amilográfica:

##### ✓ Consistencia inicial a 30°C (Ci)

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.17 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la consistencia inicial a 30°C, en la Tabla 4.18. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la consistencia inicial a 30°C.

En la Figura 4.13 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.14 los efectos principales, para la consistencia inicial a 30°C de las harinas extrudidas de sorgo integral.

**Tabla 4.17.** Análisis de la Varianza para la Consistencia inicial a 30°C.

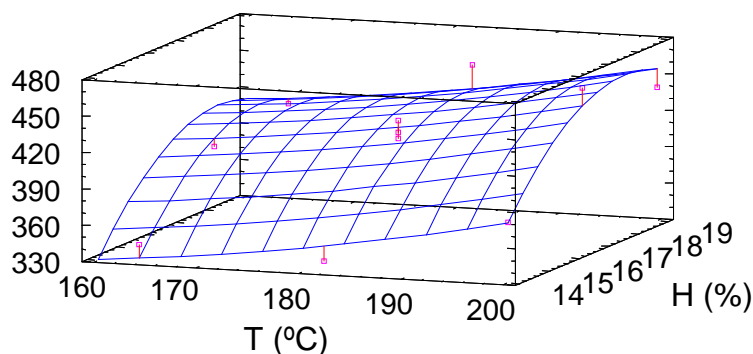
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	2816,67	1	2816,67	48,29	<b>0,0201</b>
Humedad	9204,17	1	9204,17	157,79	<b>0,0063</b>
TT	50,7018	1	50,7018	0,87	0,4496
TH	6,25	1	6,25	0,11	0,7745
HH	2763,2	1	2763,2	47,37	<b>0,0205</b>
Falta de ajuste	1196,38	3	398,794	6,84	<b>0,1303</b>
Error Puro	116,667	2	58,3333		
Total (corr.)	16154,5	10			

R-cuadrado = 91,872 por ciento  
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 83,7439 por ciento  
 Error Estándar de Est. = 7,63763  
 Error absoluto de la media = 9,47368  
 Estadístico Durbin-Watson = 2,11416 (P=0,4296)  
 Autocorrelación residual Lag 1 = -0,145671

**Tabla 4.18.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Consistencia inicial a 30°C.

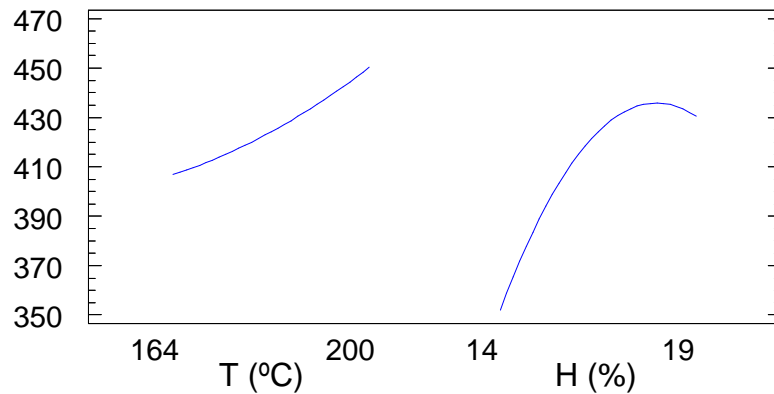
Constante	= -1118,04
Temperatura	= -3,36395
Humedad	= 195,101
TT	= 0,0138077
TH	= -0,0277778
HH	= -5,28421

Consistencia inicial a 30°C



**Figura 4.13.** Superficie respuesta para la Consistencia inicial a 30°C de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

Consistencia inicial  
a 30°C



**Figura 4.14.** Efectos principales para la Consistencia inicial a 30°C de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

Los resultados del ANOVA realizado para la Ci, indican que los términos más significativos fueron los lineales y HxH, correspondiéndole el mayor grado de significación a H (Figura 4.13). A partir del análisis de la Figura 4.14 concluimos que la Ci aumenta con el aumento de la T y de la H, pero a H más alta comienza a disminuir. Esto se explicaría, teniendo en cuenta que a menor H la degradación mecánica de los gránulos de almidón es mayor y por lo tanto a mayor H, habrá mayor proporción de gránulos enteros lo cual se traduce en mayor viscosidad.

#### ✓ **Consistencia inicial a 95°C (C95i)**

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.19 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la consistencia inicial a 95°C, en la Tabla 4.20. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la consistencia inicial a 95°C.

En la Figura 4.15 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.16 los efectos principales, para la consistencia inicial a 95°C de las harinas extrudidas de sorgo integral.

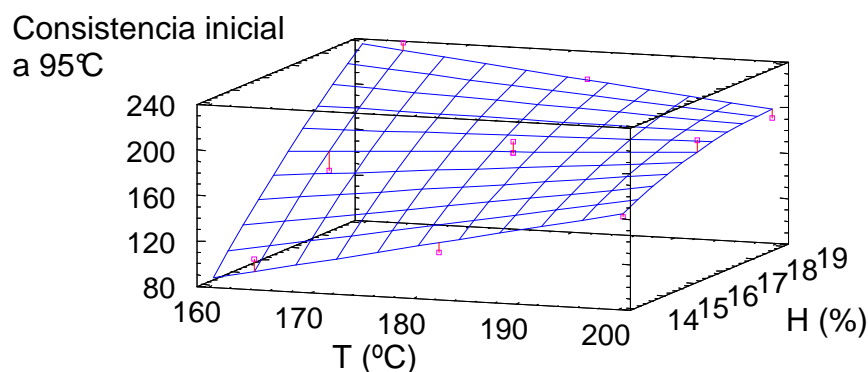
**Tabla 4.19.** Análisis de la Varianza para la Consistencia inicial a 95°C.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	459,375	1	459,375	13,78	<b>0,0655</b>
Humedad	11704,2	1	11704,2	351,12	<b>0,0028</b>
TT	0,0986842	1	0,0986842	0,00	0,9616
TH	2626,56	1	2626,56	78,80	<b>0,0125</b>
HH	185,307	1	185,307	5,56	0,1424
Falta de ajuste	713,13	3	237,71	7,13	<b>0,1255</b>
Error Puro	66,6667	2	33,3333		
Total (corr.)	15767,0	10			

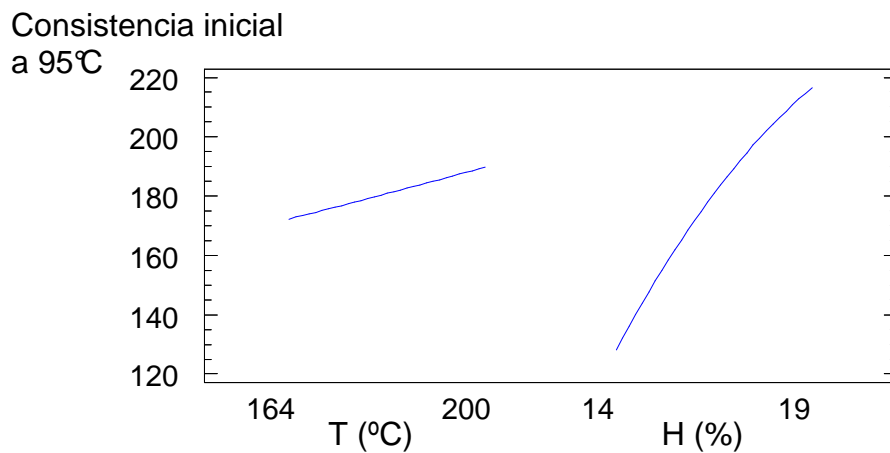
R-cuadrado = 95,0543 por ciento  
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 90,1085 por ciento  
 Error Estándar de Est. = 5,7735  
 Error absoluto de la media = 6,82616  
 Estadístico Durbin-Watson = 1,57528 (P=0,2132)  
 Autocorrelación residual Lag 1 = 0,172715

**Tabla 4.20.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Consistencia inicial a 95°C.

Constante	= -2261,47
Temperatura	= 9,66021
Humedad	= 166,463
TT	= 0,000609162
TH	= -0,569444
HH	= -1,36842



**Figura 4.15.** Superficie respuesta para la Consistencia inicial a 95°C de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



**Figura 4.16.** Efectos principales para la Consistencia inicial a 95°C de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

El análisis de ANOVA indica que los términos más significativos fueron el lineal dado por la H y el término de interacción TxH, lo cual justifica la distorsión del plano observado en la Figura 4.15, pero el efecto de la T no fue despreciable (0,0655). A partir del análisis de la Figura 4.16 concluimos que la C95i aumenta con el aumento de la H y lo hace más paulatinamente con el aumento de T. La tendencia es similar a la observada para Ci a 30°C y vale la misma explicación.

#### ✓ **Consistencia final a 95°C (C95f)**

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.21 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la consistencia final a 95°C, en la Tabla 4.22. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la consistencia final a 95°C.

En la Figura 4.17 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.18 los efectos principales, para la consistencia final a 95°C de las harinas extrudidas de sorgo integral. Nuevamente, la tendencia es similar a la observada para las dos anteriores (Ci a 30°C y C95i).

**Tabla 4.21.** Análisis de la Varianza para la Consistencia final a 95°C.

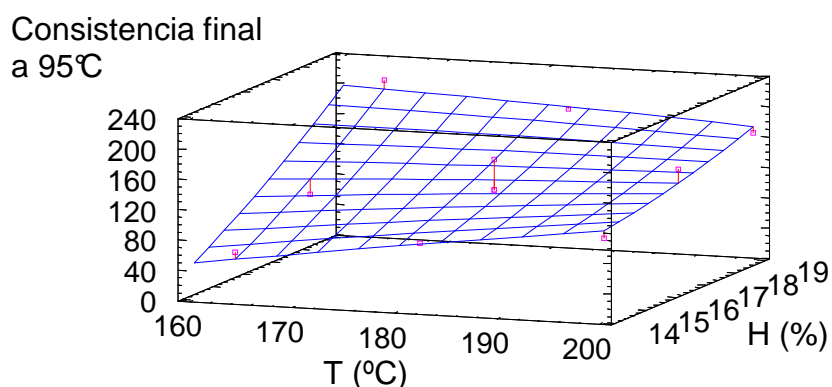
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	651,042	1	651,042	1,22	0,3844
Humedad	14751,0	1	14751,0	27,66	<b>0,0343</b>
TT	3,95833	1	3,95833	0,01	0,9392
TH	1914,06	1	1914,06	3,59	0,1987
HH	98,9583	1	98,9583	0,19	0,7086
Falta de ajuste	1173,44	3	391,146	0,73	<b>0,6209</b>
Error Puro	1066,67	2	533,333		
Total (corr.)	19655,7	10			

R-cuadrado = 88,6033 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 77,2065 por ciento  
Error Estándar de Est. = 23,094  
Error absoluto de la media = 12,2727  
Estadístico Durbin-Watson = 0,842323 (P=0,0070)  
Autocorrelación residual Lag 1 = 0,540843

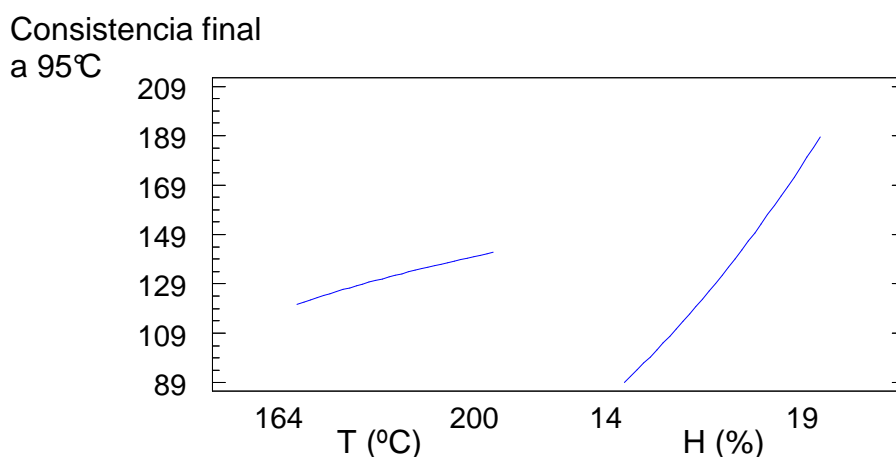
**Tabla 4.22.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Consistencia final a 95°C.

Constante	= -1615,41
Temperatura	= 10,0039
Humedad	= 75,3056
TT	= -0,00385802
TH	= -0,486111
HH	= 1,0

Al observar el ANOVA realizado para la C95f, se concluye que el único término lineal significativo fue el correspondiente al de la H. Al analizar la Figura 4.17 confirmamos que la T no afecta significativamente a la C95f, tal como fue estudiados en otro trabajos sobre harinas de maíz (Haller, 2008).



**Figura 4.17.** Superficie respuesta para la Consistencia final a 95°C de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



**Figura 4.18.** Efectos principales para la Consistencia final a 95°C de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

✓ **Retrogradación**

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.23 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la retrogradación, en la Tabla 4.24. Teniendo en



cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p>0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la retrogradación.

En la Figura 4.19 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.20 los efectos principales, para la retrogradación de las harinas extrudidas de sorgo integral. En trabajos anteriores (González, et al 2002) se ha observado, que la consistencia de retrogradación está inversamente relacionada con el grado de cocción. Las mayores consistencias corresponden a los mayores valores de H lo cual es coherente con los valores obtenidos para las otras propiedades ya analizadas.

**Tabla 4.23.** Análisis de la Varianza para la Retrogradación.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	3266,67	1	3266,67	20,63	<b>0,0452</b>
Humedad	28704,2	1	28704,2	181,29	<b>0,0055</b>
TT	5070,18	1	5070,18	32,02	<b>0,0298</b>
TH	4556,25	1	4556,25	28,78	<b>0,0330</b>
HH	3612,68	1	3612,68	22,82	<b>0,0411</b>
Falta de ajuste	5956,91	3	1985,64	12,54	<b>0,0747</b>
Error Puro	316,667	2	158,333		
Total (corr.)	49690,9	10			

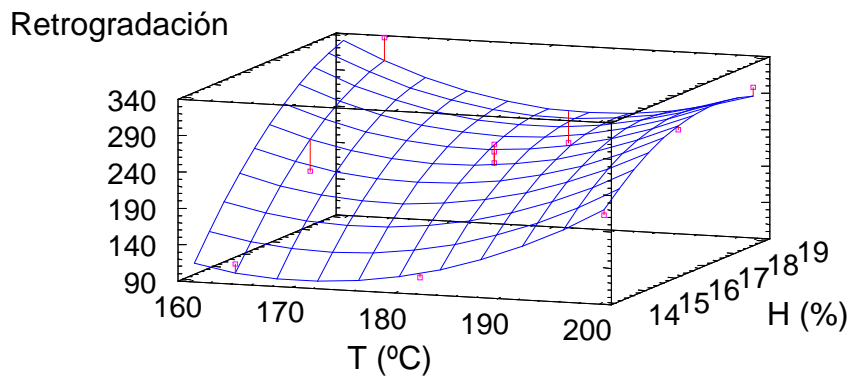
R-cuadrado = 87,3748 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 74,7496 por ciento  
Error Estándar de Est. = 12,5831  
Error absoluto de la media = 18,9753  
Estadístico Durbin-Watson = 1,6381 (P=0,2519)  
Autocorrelación residual Lag 1 = 0,165241

**Tabla 4.24.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Retrogradación.

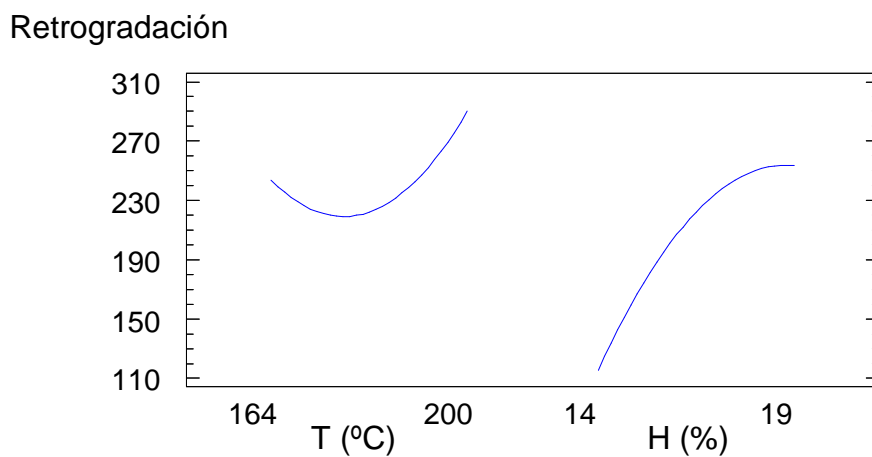
Constante	= 206,118
Temperatura	= -36,5886
Humedad	= 363,556
TT	= 0,138077
TH	= -0,75
HH	= -6,04211

Del análisis de ANOVA se obtiene que los términos significativos fueron, no solo los lineales, si no también TxT, HxH y HxT ( $p<0.05$ ), lo cual explicaría la

distorsión del plano observado en la Figura 4.18 y las curvaturas de las líneas en la Figura 4.20, la que a su vez permite apreciar que el mayor grado de significación le correspondió a la H.



**Figura 4.19.** Superficie respuesta para la Retrogradación de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



**Figura 4.20.** Efectos principales para la Retrogradación de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

#### 4.2.4. Gelatinización (G%)

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.25 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para la gelatinización, en la Tabla 4.26. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la gelatinización.

En la Figura 4.21 se muestra la superficie respuesta para la gelatinización de las harinas extrudidas de sorgo integral.

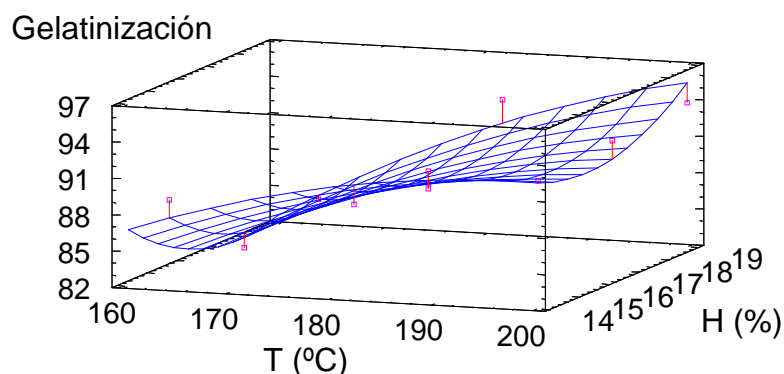
**Tabla 4.25.** Análisis de la Varianza para la Gelatinización.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	90,9773	1	90,9773	155,89	<b>0,0064</b>
Humedad	0,00606934	1	0,00606934	0,01	0,9281
TT	4,2626	1	4,2626	7,30	0,1140
TH	10,2909	1	10,2909	17,63	0,0523
HH	11,8865	1	11,8865	20,37	<b>0,0458</b>
Falta de ajuste	15,1693	3	5,05645	8,66	<b>0,1052</b>
Error Puro	1,16721	2	0,583605		
Total (corr.)	130,909	10			

R-cuadrado = 87,5207 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 75,0414 por ciento  
Error Estándar de Est. = 0,763941  
Error absoluto de la media = 1,05873  
Estadístico Durbin-Watson = 2,05112 (P=0,4786)  
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,108891

**Tabla 4.26.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la Gelatinización.

Constante	= 118,823
Temperatura	= 1,0855
Humedad	= -17,937
TT	= -0,00400356
TH	= 0,0356437
HH	= 0,346578



**Figura 4.21.** Superficie respuesta para la Gelatinización de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

Los resultados del ANOVA muestran que el término lineal significativo es el que corresponda a la T y además el término de interacción HxH, pero tampoco fue despreciable la interacción TxH (0,0523) a la que se le adjudica la distorsión del plano observada en la Figura 4.20. Esto puede explicarse, teniendo en cuenta que G%, es una medida del % de gránulos que han perdido la cristalinidad y es razonable pensar que la T sea el factor más importante, ya que a medida que T aumenta, se asegura la fusión de los cristalitos, siendo el efecto de T más evidente a mayor H.

#### 4.2.5. Observación microscópica

De la observación microscópica correspondiente a cada una de las muestras, surgió que prácticamente todas las muestras presentaron, al menos en muy baja cantidad, gránulos de almidón con la cruz de malta.

Debido a que con la observación directa la cuantificación de la proporción de partículas conteniendo gránulos de almidón con la cruz de malta, presenta una alta

variabilidad para cada muestra, se agruparon las muestras de acuerdo a la proporción de gránulos con cruz de malta observada, en cuatro rangos de valores:

**X:** muestra con más del 75% de gránulos con Cruz de Malta

**XX:** muestra conteniendo entre 75 y 50% de gránulos con Cruz de Malta

**XXX:** muestra conteniendo entre 50 y 25% de gránulos con Cruz de Malta

**XXXX:** muestra conteniendo menos del 25% de gránulos con Cruz de Malta

En las Tabla 4.12 se observa que la muestra obtenida a 164°C y 19 %H posee la mayor proporción de gránulos con la cruz de malta, mientras que la obtenida a 200°C y 14H% posee la menor cantidad de gránulos de cruz de malta, estos resultados de evaluación microscópica se corresponden con los resultados ya analizados, los cuales indicaban que la primera es la de menor GC y al segunda la de mayor GC.

#### **4.3. Conclusiones acerca de las características fisicoquímicas y texturales de los productos expandidos y de las propiedades de hidratación de sus harinas**

Los resultados de la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y de hidratación de las muestras extrudidas y sus harinas, indican que, coincidiendo con lo observado en otros trabajos (Pérez y col., 2008; González, y col., 2003), la DS se relaciona de manera inversa con el GC, es decir la muestra de mayor dureza es la de menor GC: 164°C y 19% H y por su parte la más blanda es la obtenida a 200°C y 14%H, de mayor GC. Además, la relación inversa observada entre la DM y el CEEM es coherente con lo esperable y observado (Lassa, 2008), ya que a mayor GC la muestra es más expandida, posee mayor VE y por lo tanto es menos dura. Para la extrusión de harina de maíz se ha observado (González y col., 2002) que el CEEM

es un buen indicador del grado GC, existiendo una relación directa entre ambos. Con respecto a la E, se puede destacar que el mayor valor se obtiene a 164°C y 14% de H y tal como ocurre con el CEEM, disminuye con el aumento tanto de T como de H. Este efecto se atribuye al hecho que a los menores valores de H y de T, la componente elástica del fluido o “melt”, es mayor que para los valores más elevados de esas variables.

Es sabido que la S y el VE, son buenos indicadores del GC (González y col., 2002) y que ambas propiedades se relacionan directamente con el GC, se observa que a medida que el GC aumenta, tanto S como VE, aumentan. Por el contrario, la AA no es un buen indicador, ya que esta propiedad depende de la proporción de almidón cocido, pero con bajo grado de destrucción granular (gránulos que han perdido su estructura cristalina, pero con morfología granular).

En este punto, es importante recordar que el proceso de extrusión no es un proceso “tipo pistón”, es decir que el transporte de las partículas dentro del extrusor se caracteriza por su distribución de tiempos de residencia (DTR), la cual presenta una dispersión suficientemente grande como para que el material extrudido, aunque visualmente sea homogéneo, no lo sea desde el punto de vista del GC (el cual se define como el grado de destrucción de la estructura granular del almidón) (González y col., 2002). Así, en todo producto extrudido, es posible encontrar partículas con distinto GC (grado de destrucción tanto de la estructura cristalina como de la granular). Estas pueden contener gránulos sin cocción (con la cruz de malta), gránulos cocidos (sin la cruz de malta) parcialmente destruidos y gránulos cocidos y totalmente destruidos (Haller, 2008). Cuando las condiciones de extrusión corresponden a bajos GC, un aumento de T o una disminución de H, producirá una disminución de gránulos sin cocción y un aumento de las otras dos fracciones. A

medida que las condiciones se hacen más severas, los gránulos nativos desaparecen y aumenta la proporción de gránulos destruidos, lo cual verificamos en la observación al microscopio y en porcentaje de gelatinización. Estos últimos poseen menor capacidad de AA que los gránulos cocidos sin destruir. Por lo tanto, la AA crece a medida que aumenta el GC hasta alcanzar un máximo y luego todo aumento del grado de cocción, producirá una disminución de la AA. Ese máximo depende de varios factores (entre otros, del nivel de cada una de las variables de extrusión como el diámetro de boquilla, relación de compresión, rpm del tornillo, etc.). En nuestro caso, tanto los valores de S, como los de VE de las muestras extrudidas, corresponderían a altos GC, por lo tanto se debería esperar una relación inversa entre S y AA, lo cual no es lo observado. Esta discrepancia con la tendencia normalmente observada, cuando se trabaja con sémola proveniente de granos desgerminados y descascarados, podría atribuirse al efecto de la fibra sobre la extrusión. La fibra disminuye la fricción generada durante la extrusión, reduciendo el GC que se puede alcanzar; este GC incompleto se manifiesta en la relación directa que encontramos entre la S y la AA.

Considerando el análisis de todas las características fisicoquímicas y sensoriales de los diferentes productos extrudidos y las propiedades de hidratación de sus respectivas harinas, y que en trabajo realizado por Acosta- Sánchez (2003) se concluyó que la humedad del 14% producía la mejor calidad de sorgo extrudido, se puede considerar que la extrusión de sorgo integral a 182°C de temperatura y 14% de humedad permitió obtener una muestra con buenas características fisicoquímicas, apropiadas para un producto expandido. Siendo estas las condiciones de extrusión seleccionadas para obtener un producto de sorgo integral

expandido apropiado, se procede a estudiar algunas características nutricionales del mismo.

#### 4.4. Evaluaciones nutricionales de las harinas integrales de sorgo

##### 4.4.1. Análisis de la composición centesimal

En primer lugar, se destaca que el análisis de la presencia de taninos, de acuerdo al nuevo estándar de comercialización de sorgo (Resolución 554/2011 Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria), permitió clasificar la muestra de sorgo utilizada para este estudio, como baja en tanino o sin taninos condensados, ya que más del 95% de los granos tomaron una coloración blanca cremosa luego del tratamiento de blanqueo (Figuras 4.22).



**Figura 4.22.** A) Sorgo Nativo. B) Sorgo posterior al tratamiento de blanqueo.

Como se ha mencionado en la conclusión del análisis anterior, las condiciones más adecuadas para la obtención de productos extrudidos de sorgo integral, considerando las mejores características, tanto fisicoquímicas como sensoriales, fueron 182°C de temperatura y 14% de humedad. En la Tabla 4.27, se muestra la composición centesimal de la harina obtenida en estas condiciones y de la harina nativa de sorgo integral, todas las determinaciones se realizaron por duplicado y se informan los valores promedios.



**Tabla 4.27.** Composición centesimal en base seca para la harina de sorgo integral nativa y la obtenida por extrusión a 182°C 14%H.

<b>Composición Centesimal</b>	<b>Harina de sorgo integral nativa</b>	<b>Harina de sorgo integral extrudida a 182°C/14%H</b>
Humedad	13,8 ± 0,02	8,15 ± 0,42
Proteínas	11,01 ± 0,09	10,67 ± 0,04
Extracto etéreo	2,72 ± 0,05	2,72 ± 0,02
Fibra Dietaria Total	8,79 ± 1,30	9,92 ± 1,15
Fibra Dietaria Soluble	1,08 ± 0,62	1,4 ± 0,38
Fibra Dietaria Insoluble	7,71 ± 0,87	8,51 ± 0,90
Cenizas	1,53 ± 0,01	1,53 ± 0,03

Los resultados para la harina de sorgo integral nativa se encuentran dentro de los rangos de valores encontrados en la bibliografía para el grano entero de sorgo. Al respecto, Ragaee y col. (2006) observaron contenidos en base seca de: proteínas: 12,1 ± 0,1 (N x 6,25), grasa cruda: 3,32 ± 0,1 y cenizas: 1,87 ± 0,03, determinados por métodos de la Asociación Americana de Química de Cereales. Martínez y Pau (1992) observaron valores de humedad: 10,5%, proteínas: 10,9 %, grasas: 2,57, cenizas: 1,5% y fibra: 1,135%, probablemente este valor se refiere a fibra bruta aunque no lo especifica. Asimismo, la FAO (1995) en el trabajo “El sorgo y el mijo en la nutrición humana” indicó la composición del grano de sorgo con un 12% de humedad en g/100g de producto comestible, como: proteínas: 10,4%, grasas: 3,1%, cenizas 1,6% y fibra: 2%. Para este último valor sería válido el comentario anterior, respecto a que probablemente no se refiera a fibra dietaria total.

A través de un análisis de ANOVA (Tabla 4.28) se determinó, puesto que el p-valor del test F es superior o igual a 0,05, que no hay diferencia estadísticamente

significativa entre las determinaciones de proteínas, extracto etéreo, fibra total y cenizas de la muestra nativa y la extrudida a 182°C–14%H, al igual que se a observado en el trabajo realizado por Martínez y Pau (1992), el que tuvo como objetivos fundamentales la elaboración de productos instantáneos utilizando como materia prima sorgo blanco integral y decorticado, con tres diferentes contenidos de humedad (12, 15 y 18%) para la extrusión y donde se observó que los productos expandidos obtenidos no fueron afectados en sus contenidos de proteína, grasa, fibra y cenizas.

**Tabla 4.28.** Análisis de la Varianza de la composición centesimal de la muestra nativa y la extrudida a 182°C 14%H.

Fuente	P-Valor
Proteínas	0.0565
Extracto etéreo	0.1917
Fibra	0.3647
Cenizas	0.6352

Asp y col., (1989) señalaron que para el caso de los cereales, el proceso de extrusión no afectó el tenor de fibra cruda, mientras que lo aumentó en el caso de las leguminosas. Sin embargo, los resultados de variación del contenido de fibra dietaria total, soluble e insoluble por efecto de la extrusión informados por distintos investigadores son diversos (Drago y col., 2010).

Respecto al perfil de fibra soluble e insoluble, tampoco hubo diferencias significativas para la harina nativa y extrudida.

Considerando la ingesta diaria recomendada para fibra total (25g/día) para un individuo adulto, una ración de 25 g de este producto extrudido cubriría el 10%.

En la Tabla 4.29 se presentan los resultados obtenidos para las evaluaciones nutricionales correspondientes a las muestras de sorgo integral extrudido, para taninos, pérdida de fitatos, polifenoles y actividad antioxidante.

**Tabla 4.29.** Contenido de taninos (TA), pérdida de fitatos (Pérdida de F), polifenoles (PF) y actividad antioxidante (AO) de las muestras de sorgo integral extrudidos.

Temperatura (°C)	Humedad (%)	TA (mg%)	Pérdida de F (%)	PF (mg AG/g)	AO (µmol TEAC/g)
164	14	14,57	42,99	1,20	31,98
	16,5	10,54	41,00	1,24	37,96
	19	4,45	39,82	1,32	38,66
182	14	13,14	44,28	1,37	41,05
	16,5	12,87	43,65	1,29	39,17
	16,5	9,60	43,20	1,26	34,71
	16,5	11,15	42,90	1,21	40,52
	19	7,46	39,87	1,29	40,96
200	14	7,50	50,25	1,14	31,23
	16,5	11,76	47,41	1,28	38,31
	19	9,89	44,58	1,40	36,65

#### 4.4.2. Contenido de taninos (TA)

El contenido inicial de taninos en los granos enteros de sorgo utilizados en la investigación fue de 21,13 mg%, siendo la cantidades informadas en la bibliografía muy diversas, acorde al tipo de grano (Ojeda y col., 2010).

El contenido de TA en las muestras extrudidas varió de 4,45 a 14,54 mg%. Los resultados del ANOVA para el efecto de las variables en el contenido de TA se muestran en la Tabla 4.30 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizado, en la Tabla 4.31. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre el contenido de TA.

En la Figura 4.23 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.24 los efectos principales, para el contenido de taninos de las harinas extrudidas de sorgo integral.

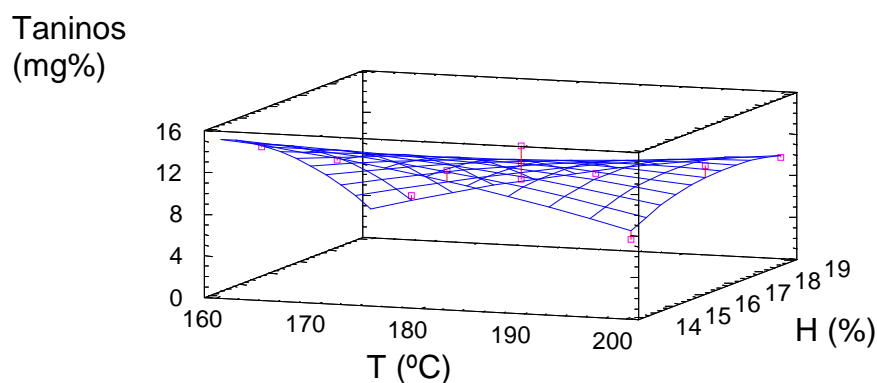
**Tabla 4.30.** Análisis de la Varianza para el contenido de Taninos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
T:temperatura	0,0300212	1	0,0300212	0,01	0,9253
H:Humedad	29,9883	1	29,9883	11,21	0,0788
TT	1,1065	1	1,1065	0,41	0,5860
TH	39,1485	1	39,1485	14,64	0,0620
HH	5,72864	1	5,72864	2,14	0,2809
Falta de ajuste	3,30719	3	1,1024	0,41	<b>0,7638</b>
Error Puro	5,34842	2	2,67421		
Total (corr.)	86,6264	10			

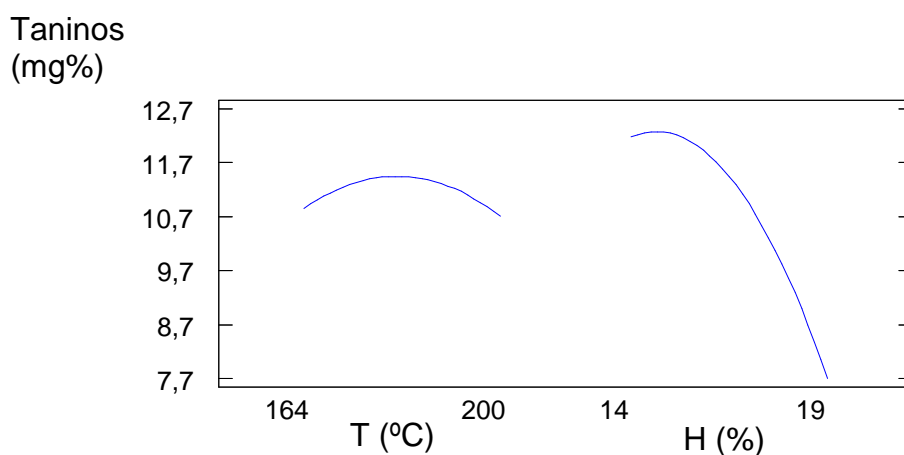
R-cuadrado = 90,0081 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 80,0163 por ciento  
Error Estándar de Est. = 1,6353  
Error absoluto de la media = 0,70717  
Estadístico Durbin-Watson = 2,33717 (P=0,2680)  
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,210411

**Tabla 4.31.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para el contenido de taninos.

Constante	= 102,619
Temperatura	= -0,408543
Humedad	= -5,60718
TT	= -0,00203978
TH	= 0,0695209
HH	= -0,240602



**Figura 4.23.** Superficie respuesta para el contenido de taninos de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



**Figura 4.24.** Efectos principales para el contenido de taninos de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

El resultado del ANOVA para el efecto de las variables en el contenido de TA indicó que ninguno de los términos fue significativo, aunque el efecto de la H no fue despreciable ( $p: 0,0788$ ). El contenido de TA en el extracto disminuyó con el aumento de la H. Esta tendencia se puede ver en las Figuras 4.23 y 4.24.

Luego del tratamiento térmico de extrusión, se observó una reducción en la cantidad de TA extraída que varió entre un 31,01 y 78,92% del valor inicial.

Awika (2003) informó que luego de la extrusión, muestras de sorgos con alto contenido de taninos retuvieron sólo el 21% del valor inicial, medido con el método vainillina-HCl de Price y col. (1978). Esta reducción fue atribuida a que la estructura de los taninos se descompone y se produce un reordenamiento químico, por lo que el procesamiento puede alterar estructuralmente a los taninos. También observaron que la extrusión disminuyó el grado de polimerización de las proantocianidinas, en comparación con el material de grano crudo, causando una disminución del 85% en taninos poliméricos, mientras que los taninos de bajo peso molecular aumentaron en un 29% (tetrameros) y en un 478% (monómeros). La disminución en el nivel de taninos no significa que se pierden, sino que durante el procesamiento la unión a otras moléculas (es decir, proteínas, carbohidratos, minerales) dificulta su extracción (Awika y col., 2003a). En otro trabajo realizado sobre sorgo y sorgo con agregado de salvado, luego de la extrusión realizada con un extrusor mono- tornillo marca Maddox MX-3001 a 300 rpm, 149°C y 14% de H y un tamaño de partícula mayor a la de un tamiz N°30, se observó una reducción de los taninos que variaba entre 50,8% y 76,6% (Turner, 2004). Por otra parte, al comparar la reducción de TA en sorgo, producida por los procesos de fermentación y extrusión, Ngwenya (2007) observó que el tratamiento más severo era el segundo, donde la pérdida fue 97% para sorgo con alto contenido de taninos.

#### **4.4.3. Pérdida de fitatos (Pérdida de F)**

El contenido inicial de fósforo correspondiente a fitatos en los granos enteros de sorgo utilizados en la investigación fue de 0,52%, esto corresponde a 1,83 g% de

ácido fítico. El contenido de fitatos (F) informado en la bibliografía para sorgo integral es muy diverso, desde  $0,17 \pm 0,03\%$  (Ojeda y col., 2010) hasta  $0,77\%$  (Wayne, 2000). El contenido de F en las muestras extrudidas varió de  $1,10$  a  $0,91g \%$ , correspondiendo a pérdidas de  $39,82$  a  $50,25\%$ .

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.32 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para los efectos de las variables en pérdida de F, en la Tabla 4.33. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0,05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la pérdida de F.

En la Figura 4.25 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.26 los efectos principales, para las pérdidas de F de las harinas extrudidas de sorgo integral.

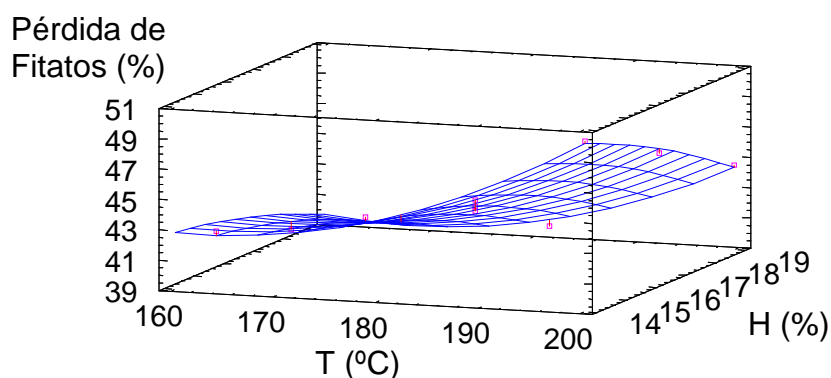
**Tabla 4.32.** Análisis de la Varianza para las pérdidas de fitatos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Temperatura	56,5074	1	56,5074	396,80	<b>0,0025</b>
Humedad	29,274	1	29,274	205,57	<b>0,0048</b>
TT	7,17869	1	7,17869	50,41	<b>0,0193</b>
TH	1,56891	1	1,56891	11,02	0,0800
HH	0,511544	1	0,511544	3,59	0,1985
Falta de ajuste	1,25868	3	0,419561	2,95	<b>0,2636</b>
Error Puro	0,284815	2	0,142408		
Total (corr.)	96,0725	10			

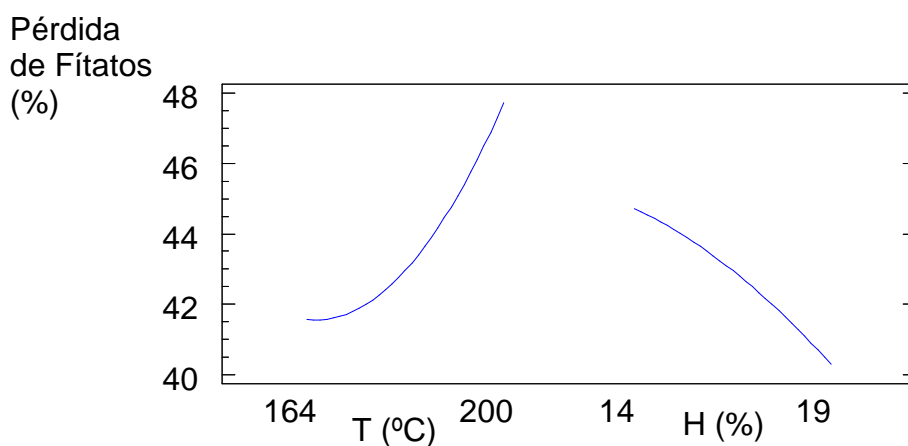
R-cuadrado = 98,3934 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96,7868 por ciento  
Error Estándar de Est. = 0,377369  
Error absoluto de la media = 0,328101  
Estadístico Durbin-Watson = 2,11164 (P=0,4316)  
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,0707825

**Tabla 4.33.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para las pérdidas de fitatos.

Constante	= 137,237
Temperatura	= -1,49105
Humedad	= 4,02205
TT	= 0,00519555
TH	= -0,0139174
HH	= -0,0718978



**Figura 4.25.** Superficie respuesta para las pérdidas de fitatos de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



**Figura 4.26.** Efectos principales para las pérdidas de fitatos de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



Del análisis de ANOVA se desprende que los términos lineales de las dos variables (T y H) fueron significativos, como así también el término TxT, lo que explica la curvatura que se presenta en la Figura 4.25, para la pérdida de F.

La Figura 4.26 muestra que se pierde fitatos al aumentar T y al disminuir H, alcanzando una pérdida de fitatos entre el 40 y el 50%, correspondiendo las muestras de menor y mayor pérdidas a las muestras con menor y mayor GC, respectivamente.

De acuerdo a lo observado en otros trabajos, las reducciones de fitatos varían entre un 13% a un 86% en productos (panes, tostadas) que se obtienen por extrusión de harina de trigo (Le Francois, 1988), mientras que en otro trabajo realizado con centeno integral, la extrusión a 170°C produjo una reducción de fitatos del 23% (Fretzdorff y col., 1986). Cuando la materia prima fue harina de frijol, los resultados indicaron que la extrusión disminuyó significativamente el contenido de ácido fítico (Batista y col., 2010). A su vez, en la investigación realizada por Antón (2009) la reducción en frijoles extrudidos fue entre un 50% y 100% en comparación con los crudos.

En otros trabajos, también se observó una reducción de fitatos, con producción de las diferentes especies fosfatadas (IP5, IP4, etc) (Ummadi y col., 1995).

#### **4.4.4. Contenido de polifenoles (PF)**

La concentración de polifenoles totales determinados por el método Folin, y cuya extracción se realizó con una mezcla 20% de agua y 80% de acetona, fue de

0,2 g AG % de muestra para la muestra de sorgo integral y varió entre 1,14 y 1,40 mg AG/ g muestra para las muestras de sorgo integral extrudidas (Tabla 4.29).

Ayyat y col. (1988) realizaron la extracción, determinación y fraccionamiento de polifenoles de sorgo utilizando diferentes procedimientos. Encontraron que el método que utiliza el reactivo Folin fue el más sensible para medir PF en sorgos con bajo contenido de taninos, realizando la extracción con una mezcla de 20% de agua y 80% de acetona.

Ojeda y col. (2010) realizaron un estudio con la finalidad de evaluar el contenido de taninos, fósforo correspondiente a fítico y actividad de fitasas en granos de diferentes híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L) Moench). Se analizaron 12 muestras de híbridos representativas y se determinó que la cantidad de Fenoles Totales, expresada como % de Equivalentes de Ácido Tánico (% Eq AT), varió entre 0,37 hasta 1,48 %.

Otros trabajos determinaron que la cantidad de PF en sorgo, expresado como porcentaje de ácido gálico (%AG) fue de  $2,34 \pm 0,03\%$  a través del método Folin y utilizando para extraer los compuestos fenólicos una fase líquida compuesta por metanol-agua (50:50) (Padilla y col., 2008) y de 0,41 % expresado como equivalentes de AG (Ragae y col., 2006). Esto indica, que los resultados pueden ser muy variables dependiendo del método de extracción y determinación utilizado, además de la variedad de sorgo analizado.

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.34 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para el efecto de las variables en el contenido de polifenoles, en la Tabla 4.35. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue

significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre el contenido de polifenoles.

En la Figura 4.27 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.28 los efectos principales, para el contenido de polifenoles de las harinas extrudidas de sorgo integral.

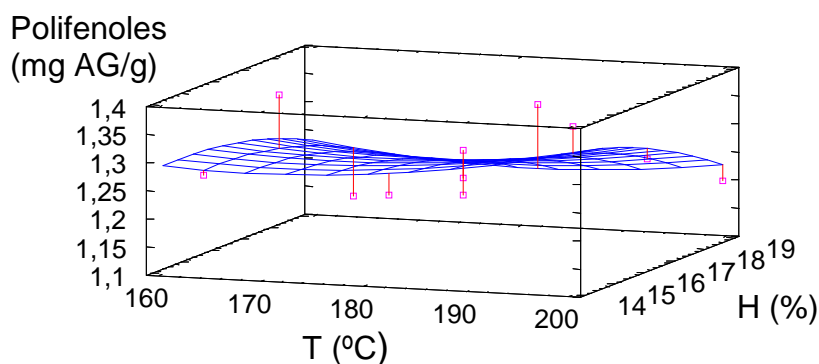
**Tabla 4.34.** Análisis de la Varianza para el contenido de Polifenoles.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
T:temperatura	0,00166667	1	0,00166667	0,21	0,4188
H:Humedad	0,0130667	1	0,0130667	1,66	0,1056
TT	0,00112281	1	0,00112281	0,14	0,4942
TH	0,0009	1	0,0009	0,11	0,5352
HH	0,000909474	1	0,000909474	0,12	<b>0,1218</b>
Error Total	0,0393772	5	0,00787544		
Total (corr.)	0,0566182	10			

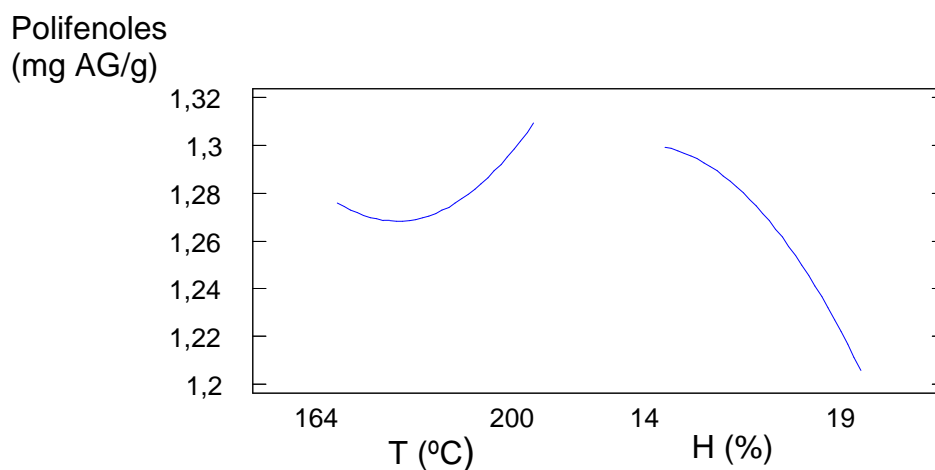
R-cuadrado = 30,4513 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 por ciento  
Error Estándar de Est. = 0,0887437  
Error absoluto de la media = 0,0499043  
Estadístico Durbin-Watson = 1,17826 (P=0,0506)  
Autocorrelación residual Lag 1 = 0,371186

**Tabla 4.35.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para el contenido de Polifenoles.

Constante	= 1,73702
Temperatura	= -0,0172258
Humedad	= 0,142042
TT	= 0,0000649773
TH	= -0,000333333
HH	= -0,00303158



**Figura 4.27.** Superficie respuesta para el contenido de polifenoles de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



**Figura 4.28.** Efectos principales para el contenido de polifenoles de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

Del análisis de los resultados para PF, se desprende de la tabla de ANOVA que ninguno de los términos del polinomio fue significativo, como también se puede ver en la Figura 4.27. En la Figura 4.28 se ve la tendencia que al aumentar la H de extrusión, los PF extraídos disminuyen. Remy y col. (2000) observaron que la mayor

H de extrusión generó polimerizaciones de compuestos fenólicos y por lo tanto se observa una reducción del contenido de fenoles totales.

La reducción en el contenido de PF extraídos como consecuencia de la extrusión, varió en un rango de 30 a 41%.

Como consecuencia de la cocción extrusión realizada, por Turner (2004), con un extrusor mono-tornillo marca Maddox MX-3001 a 300 rpm, 149°C, 14 % de H y un tamaño de partícula mayor a la de un tamiz N° 30 , la reducción de PF en sorgo, varió entre un 38,6 a 46%.

Ngwenya (2007) comparó las pérdidas de fenoles en granos de sorgo por los procesos de fermentación y extrusión, y obtuvo que la mayor disminución fue en el último proceso, siendo la misma para granos de sorgo con bajo contenido de taninos, de un 33%.

Tanto la reducción en el contenido de taninos como polifenoles producida por la extrusión podría entonces explicarse, por un lado como una destrucción de la estructura con producción de monómeros u oligómeros (para el caso de taninos) o pérdida (para los PF), asociado con una disminución en la extracción relacionada con interacciones con otros componentes de la matriz.

#### **4.4.5. Capacidad antioxidante (CAO)**

Los valores de CAO encontrados en esta investigación, expresados como TEAC fueron de 41,51  $\mu\text{mol TEAC/g}$  para la muestra de sorgo nativa y para las muestras extrudidas variaron entre 31,23 y 41,05  $\mu\text{mol TEAC/g}$  muestra.

Awika (2003) comparó métodos de determinación de la CAO sobre muestras de sorgo (*Sorghum bicolor*) y sus productos. Concluyó que los métodos ORAC y DPPH no ofrecen ventajas en términos de la predicción de la CAO, en comparación

con el ABTS, que dió los resultados más rápidos y consistentes. Esto ratifica la correcta elección del método para medir CAO.

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 4.36 y los coeficientes de regresión del polinomio correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden realizados para el efecto de las variables en la capacidad antioxidante, en la Tabla 4.37. Teniendo en cuenta que la falta de ajuste no fue significativa ( $p > 0.05$ ), el modelo se consideró adecuado para describir los efectos de las variables sobre la determinación de la CAO.

En la Figura 4.29 se muestra la superficie respuesta y en la Figura 4.30 los efectos principales, para la capacidad antioxidante de las harinas extrudidas de sorgo integral.

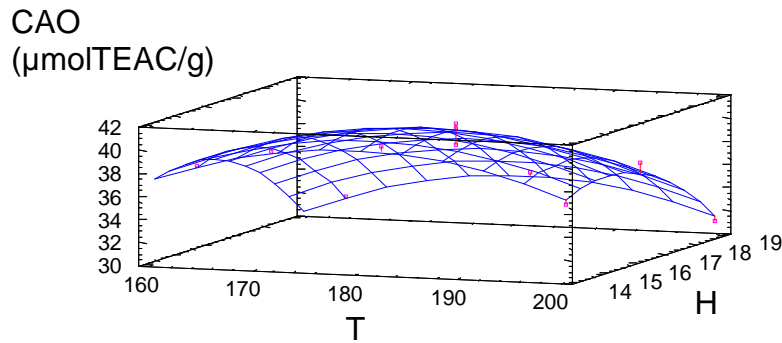
**Tabla 4.36.** Análisis de la Varianza para la capacidad antioxidante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
T: Temperatura	0,968017	1	0,968017	1,11	0,4021
H: Humedad	56,6723	1	56,6723	65,14	<b>0,0150</b>
TT	18,4212	1	18,4212	21,17	<b>0,0441</b>
TH	0,3969	1	0,3969	0,46	0,5690
HH	22,0699	1	22,0699	25,37	<b>0,0372</b>
Falta de ajuste	1,88777	3	0,629258	0,72	<b>0,6246</b>
Error Puro	1,74007	2	0,870033		
Total (corr.)	116,833	10			

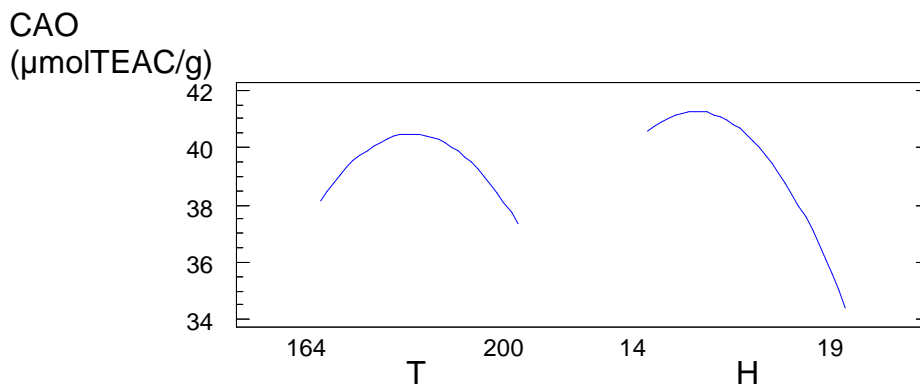
R-cuadrado = 96,8948 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 93,7897 por ciento  
Error Estándar de Est. = 0,932756  
Error absoluto de la media = 0,444721  
Estadístico Durbin-Watson = 1,33504 (P=0,0977)  
Autocorrelación residual Lag 1 = 0,270215

**Tabla 4.37.** Coeficientes de regresión correspondientes a cada uno de los términos del modelo de segundo orden para la capacidad antioxidante

Constante	= -318,425
Temperatura	= 2,89168
Humedad	= 13,081
TT	= -0,00832277
TH	= 0,007
HH	= -0,472253



**Figura 4.29.** Superficie respuesta para la capacidad antioxidante de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.



**Figura 4.30.** Efectos principales para la capacidad antioxidante de las harinas extrudidas de sorgo integral en función de la temperatura (T) y humedad (H) del proceso de extrusión.

Con respecto a la CAO, el análisis de ANOVA mostró que los términos significativos fueron, el lineal correspondiente a la H y los dados por las interacciones de TxT y HxH, la acción de los mismos se puede advertir en la

distorsión del plano de la Figura 4.29. En la Figura 4.30 se observa como el aumento de la H produjo un descenso de la CAO.

Expresado en porcentaje, la reducción de la CAO causada por la extrusión fue de un 1,10% como mínimo y de 24,75% como máximo, estos valores se encuentran en el mismo rango informado por Awika y col. (2003a) quienes trabajando con un extrusor mono-tornillo y utilizando la misma técnica para medir la actividad antioxidante, encontraron una retención de la misma en el sorgo extrudido, de 70 al 100%. Sin embargo Ngwenya (2007), trabajando con un extrusor doble-tornillo y también utilizando la misma metodología de detección, observó una reducción de 83 al 87%. Con respecto al efecto de la H sobre la pérdida de CAO, este autor observó la misma tendencia que en nuestro caso, es decir que el aumento de la H de extrusión produjo mayores pérdidas.

Padilla y col. (2008) determinaron la actividad antioxidante en nueces, variedades de semillas y sorgo, utilizando el método de decoloración del  $\beta$ -caroteno, obteniéndose un valor de 73,96 para este último. Mientras que en otro estudio realizado por Ragae y col. (2006) sobre la CAO y composición nutricional de cereales seleccionados para uso alimentario, la CAO medida a los 3 min con la técnica del ABTS, en el caso del sorgo fue de  $51,7 \pm 0,57 \mu\text{molTEAC/g}$ .

En la investigación realizada por Turner (2004) sobre sorgo y sorgo con agregado de salvado, luego de la extrusión realizada con un extrusor mono-tornillo (Maddox MX-3001) a 300 rpm, 149 °C, 14 % de H y un tamaño de partícula mayor a la de un tamiz N° 30, se observó que la reducción de la CAO varió entre 17,1 y 41,3  $\mu\text{molTEAC/g}$  medido con el método DPPH. Por otra parte, Awika y col. (2003b), trabajó con granos de sorgo con alto contenido de tanino extrudidos con un extrusor mono-tornillo (Maddox Metal Works, Inc., Dallas, TX, modelo MX-3001), a una



velocidad de 300 rpm, diámetro de 6,125 mm y la H de la muestra fue de 12%, observando una mayor CAO luego de la extrusión en sorgo descascarado (18 TEAC mmol/g), en comparación con el grano sin extrudir (7 TEAC mmol/g). Esto se puede deber al aumento de la extractabilidad de los fenoles, como también a los productos preliminares de la reacción de Maillard que generan compuestos con actividad antioxidante.

Ngwenya (2007) observó que los fenoles totales y taninos en el sorgo y productos elaborados de sorgo (papillas y extrudidos) están altamente correlacionados con la actividad antioxidante ( $R^2 = 0,96$  y  $0,94$ , respectivamente), aunque esto no fue observado en el presente trabajo de tesis.

Los extrusores mono-tornillo son adecuados para producir productos de alta expansión, generando gran fricción, y que si además el proceso implica T y H extremas, provoca la despolimerización de los taninos condensados y su conversión a oligómeros de bajo peso molecular, facilitando la interacción con otras moléculas, como las prolaminas  $\gamma$ -Kafirin, lo que explicaría la reducción significativa de la actividad antioxidante en el sorgo cocido (Emmambux y Taylor 2003). Considerando esta situación, se puede inferir que la proteína desnaturalizada por la cocción, expone estructuras que promueven las interacciones proteína-taninos. En forma contradictoria, Riedl y Hagerman (2001) manifestaron que el complejo proteína-tanino mantiene su actividad antioxidante, por lo que tenían potencial para actuar como atrapadores de radicales libres en el tracto gastrointestinal. Estudios *in vitro* han demostrado que la flora microbiana colónica puede producir la degradación de los polímeros de taninos (Déprez y col., 2000), por lo que incluso es posible que los complejos proteína-taninos puedan disociarse en el tracto gastrointestinal, liberando a los taninos.

#### 4.4.6. Evaluación de propiedades nutricionales selectas

Como se ha mencionado en el análisis anterior, las condiciones más adecuadas para la obtención de productos expandidos de sorgo integral, considerando las mejores características, tanto fisicoquímicas como sensoriales, fueron 182°C de temperatura y 14% de humedad. Esta muestra fue evaluada en cuanto a propiedades nutricionales selectas: composición centesimal, lisina disponible, disponibilidad de minerales y digestibilidad proteica.

##### 4.4.6.1. Composición centesimal

En la Tabla 4.38, se muestra la composición centesimal de la harina obtenida en estas condiciones.

**Tabla 4.38.** Composición centesimal en base seca de la Harina de sorgo integral obtenida por extrusión a 182°C 14%H.

<b>Composición Centesimal</b>	<b>Harina de sorgo integral extrudida a 182°C/14%H</b>
Humedad	8,15 ± 0,42
Proteínas	10,67 ± 0,04
Extracto etéreo	2,72 ± 0,02
Fibra Dietaría Total	9,92 ± 1,15
Fibra Dietaría Soluble	1,4 ± 0,38
Fibra Dietaría Insoluble	8,51 ± 0,90
Cenizas	1,53 ± 0,03

Como ya se mencionó, a través de un análisis de ANOVA se determinó que no hubo diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) entre los contenidos de proteínas, grasa y cenizas de la muestra nativa y la extrudida a  $182^{\circ}\text{C}$ –14%*H*. Al respecto, Martínez y Pau (1992), observaron que productos expandidos obtenidos por extrusión a partir de sorgo blanco integral decorticado, a tres diferentes contenidos de humedad (12, 15 y 18%), no difirieron en sus contenidos de proteína, grasa, fibra y cenizas.

#### 4.4.6.2. Determinación del contenido de Lisina disponible

Las condiciones de *H* y *T* que normalmente se asocian con la extrusión favorecen las reacciones de Maillard, la reducción de azúcares y su reacción con los grupos amino libres, pudiendo tener un efecto negativo sobre la digestibilidad y la disponibilidad de los aminoácidos (Björck y Asp, 1983).

La disponibilidad de lisina se puede utilizar como una medida del daño del procesamiento (Walker, 1983). En esta investigación la reducción de lisina disponible por gramo de proteína fue de 25,4% (Tabla 4.39) para la condición de extrusión que permitió obtener un producto aceptable desde el punto de vista sensorial para la elaboración de un alimento.

**Tabla 4.39.** Lisina disponible/g proteína para la harina de sorgo nativa y extrudida a 14%*H*- $182^{\circ}\text{C}$ .

	Harina de sorgo nativo	Harina de sorgo extrudida
Lisina disponible/g proteína	4,33 ± 0,40	3,23 ± 0,76

Este valor de pérdida de lisina está dentro del rango informado para otras materias primas. Björck y col. (1984) estudiaron el efecto de la cocción por extrusión

sobre el valor nutricional de proteínas de la harina de trigo y harina integral de trigo. Se observó una retención de lisina entre el 63 y el 100%, mientras que la pérdida de otros aminoácidos fue pequeña. La mínima variación observada fue consecuencia del aumento en la velocidad de avance en el extrusor, mientras que la mayor pérdida fue consecuencia del aumento en la velocidad del tornillo.

En un trabajo realizado con mezclas de harinas extrudidas de maíz y soja, los resultados de la medición de lisina disponible luego de la extrusión variaron en un rango de reducción de 3%, para las condiciones menos críticas, y de 20,5 % para las más severas (Konstance y col., 1998). Una excesiva reacción de Maillard puede provocar pérdidas de lisina hasta aproximadamente un 50%, tal como fue observado por De La Gueriviere y col. (1985) en la extrusión de trigo. En el caso de harina de arroz, la extrusión realizada a 15% de H y 120-150 °C redujo el contenido de lisina total en un 11-13% (Eggum y col., 1986). Por otra parte, Pérez-Navarrete y col. (2006) evaluaron los efectos de la extrusión sobre la calidad nutricional de una harina mezcla de maíz y frijol y observaron que la disponibilidad de lisina disminuyó entre un 15 y un 25%.

#### **4.4.6.3. Estudio del contenido de minerales**

El contenido de minerales de la muestra nativa y aquella extrudida de grano entero de sorgo utilizado en el presente trabajo se muestra en la Tabla 4.40.

**Tabla 4.40.** Contenido de Fe y Zn de grano entero de sorgo y sorgo extrudido.

	<b>Fe (mg/kg)</b>	<b>Zn (mg/kg)</b>
<b>Harina de Sorgo integral</b>	18,7 ± 0,2	9,8 ± 0,2
<b>Harina de Sorgo integral extrudido</b>	26,0 ± 0,3	13,7±0,8

Se observa que el valor alcanzado luego de la extrusión es superior al que resultaría de la materia prima. Este efecto ya ha sido observado por nuestro grupo de trabajo y por otros autores (Lassa, 2008), es decir que la extrusión produce un incremento en el contenido de hierro (Ummadi y col., 1995; Guy, 2001), lo cual puede atribuirse al aporte provocado por el desgaste del cañón y/o cilindro durante la extrusión. Esto es posible debido a que, para las condiciones de extrusión de un expandido, los niveles de fricción son elevados (valores de CEEM mayores a 500 J/g).

Los valores reportados en la bibliografía son bastante variables. Ragaee y col. (2006) determinaron el contenido de minerales en granos enteros de sorgo por espectrometría de emisión atómica, encontrando valores de Fe y Zn de 10,6 y 3,1 mg/Kg respectivamente. En el trabajo de la FAO (1995) se informaron valores sobre la composición mineral del sorgo (mg/100 g de materia seca) correspondiendo al Fe 4,2 mg% y al Zn 2,5 mg%, aunque no se aclara si se trata de granos descascarados. Por otra parte, para granos de sorgo, también se han encontrado valores de: Fe 27 ppm y Zn 20 ppm (Fachmann, 1991).

#### 4.4.6.4. Disponibilidad de minerales

En la Tabla 4.41 se muestran los resultados de disponibilidad de minerales y aporte por porción (25 g) para la muestra nativa y aquella obtenida por extrusión a 14%H-182°C.

**Tabla 4.41.** Disponibilidad y aporte potencial de Fe y Zn de la muestra nativa y la extrudida a 14%H-182°C.

	DFe%	DZn%	APFe (µg)	APZn (µg)
<b>Harina de sorgo nativa</b>	11,1 ±2,0	21,3 ±3,5	52	52
<b>Harina de sorgo extrudida</b>	9,9 ±1,8	9,9 ±1,0	65	34

Al analizar los resultados se puede observar que la DFe% no se modificó por la extrusión, mientras que la DZn% se redujo.

Watske (1998) observó que los productos extrudidos presentaron un pequeño aumento en la dializabilidad del hierro. Hazell y Johnson (1987) propusieron que los productos de la reacción de procesos bajo alta temperatura y esfuerzos de corte podrían aumentar la solubilidad de hierro por cambios en su forma química. Sin embargo, Drago y col. (2007a) evaluaron la disponibilidad de minerales en harinas de frijol (*Phaseolus vulgaris*) nativas y extrudidas a 180°C y 17%H y observaron que la DFe% de las harinas no se modificó por la extrusión, mientras que la DZn% disminuyó, coincidentemente con lo observado en este trabajo.

El efecto negativo de la extrusión en la disponibilidad del Zn, también fue observado en productos elaborados a base de mezclas maíz/ frijol (Drago y col., 2007b). Las alteraciones químicas inducidas por el calor en componentes de las harinas de legumbres, tales como fibra, ácido fítico y taninos, podrían cambiar sus

propiedades quelantes y modificar la disponibilidad de minerales (Alonso y col., 2001). Por otra parte, la degradación de fitatos a formas de inositol de menor contenido de fosfato (tetra, tri o di- fosfatos) generada por la extrusión, depende de las condiciones del proceso utilizado y no sigue un patrón definido (Ummadi y col., 1995). Los fitatos se encuentran presentes en los granos de los cereales y en las legumbres y constituyen un factor que disminuye la biodisponibilidad del hierro en estos alimentos (Hurrell, 1997). La hidrólisis de los fitatos ocurre en algunos procesos, tales como el remojo de los granos, la fermentación, la germinación y la extrusión-cocción (Sandberg, 1991). Coincidentemente, las principales sustancias inhibitoras de la absorción del zinc son los fitatos y los compuestos polifenólicos (King y col., 2000).

En la digestión de los alimentos, los micronutrientes pueden reaccionar con los productos de la digestión para dar lugar a distintas especies químicas a través de reacciones químicas y biológicas complejas y dependiendo de la naturaleza de éstas, será la capacidad del organismo para absorberlas y transportarlas. Además se pueden producir interacciones intraluminales con otras sustancias que pueden actuar como promotoras o inhibitoras de la absorción (Robb y col., 1986).

Por tal motivo para estimar el aporte de un mineral por la dieta no basta con determinar el contenido total presente en la misma, sino que es preciso conocer que cantidad se absorbe y metaboliza, por vías normales para cumplir las funciones que le son propias, concepto de biodisponibilidad (Fairweather-Tait, 1987).

Al momento de determinar la biodisponibilidad de un nutriente, es necesario tener en cuenta su interacción con sustancias que pueden favorecer o inhibir su absorción y el porcentaje que es absorbido y el que es utilizado. Consecuentemente, la evaluación in vivo es la única medida real, donde los parámetros y las técnicas

utilizadas en la actualidad sólo proporcionan aproximaciones. La posibilidad de realizar estudios de biodisponibilidad en humanos, mediante técnicas no invasivas, permite descartar los ensayos con animales y los costosos ensayos clínicos que requieren amplias precauciones y material sofisticado, difíciles de llevar a cabo con precisión y que sólo están al alcance de unos pocos laboratorios (Barberá, 1992).

Por estos motivos, se estima la biodisponibilidad por técnicas *in vitro* que comprenden desde medidas de solubilidad, dispersibilidad y dializabilidad en equilibrio o continua (Watske, 1998). Son métodos sencillos, rápidos, económicos y proporcionan información sobre determinados aspectos, que no pueden obtenerse en los ensayos con animales (Miller y col., 1981). No predicen los cambios *in vivo*, pues no pueden simular factores fisiológicos: como el estado nutricional, secreción gastrointestinal, transporte activo, interacciones con la mucosa, flora y tránsitos intestinales o algunas propiedades fisicoquímicas que influyen en la biodisponibilidad mineral (Miller y Berner, 1989); pero pretenden estimar el porcentaje de nutriente capaz de ser transformado en el tracto gastrointestinal, en una forma absorbible. Consisten básicamente en un tratamiento enzimático en dos etapas, la primera con pepsina a pH 2 y la segunda con pancreatina y bilis, a pH neutro. Luego de estos tratamientos, se determina la solubilidad o la dializabilidad de los minerales estudiados (Barberá, 1992). La dializabilidad, utilizada como un estimador de la biodisponibilidad, es la proporción de un elemento que difunde a través de una membrana semipermeable durante la etapa de digestión intestinal, después de un período que permitiría llegar al equilibrio. Se ha demostrado que la técnica de equilibrio de diálisis se puede utilizar para estimar muchos factores inhibidores o promotores de la absorción de hierro y para examinar la influencia de procesos sobre la biodisponibilidad del hierro de un alimento (Ummadi y col., 1995).



En esta tesis se ha utilizado el método de equilibrio de diálisis para estimar la disponibilidad potencial y con este valor calcular el aporte potencial de Fe y Zn (Tabla 4.41). Respecto al Fe, su AP fue mayor en el caso de los productos extrudidos. Sin embargo, siguiendo el mismo patrón que la disponibilidad de Zn, el APZn fue disminuido por la extrusión.

Considerando un requerimiento de Fe de 1,8 mg/día para un individuo adulto y de 2,2 mg/día para Zn, una ración de 25 g de producto extrudido cubriría el 3,6% para Fe y el 1,5% para Zn.

#### **4.4.6.5. Estudio de la digestibilidad proteica**

La muestra nativa presentó una digestibilidad de 53%, mientras que para la muestra extrudida a 14%H y 182°C fue de 70%, siendo esta diferencia significativa ( $p < 0.05$ ). Estos valores son aproximados a los observados por Maclean y col. (1983), quienes reportaron que la absorción de nitrógeno en granos de sorgo enteros molidos fue de 46%, mientras que para los mismo granos decorticados y extrudidos fue de 81%.

El proceso de extrusión incrementó la digestibilidad proteica un 31%. Esto confirma que el aumento de la digestibilidad proteica es una de las ventajas que se atribuyen al proceso de cocción por extrusión (Drago, 2007; Harper, 1981; Abd El Hady y Habibi, 2003).

La extrusión puede mejorar la digestibilidad de las proteínas, como fue observado en el estudio realizado por Pérez-Navarrete y col. (2006) en harina mezcla de maíz y frijol, donde se obtuvo una digestibilidad proteica del 81,75% que fue 6,5 veces mayor que la harina sin extrudir, mientras que en otro trabajo realizado por el mismo autor (Pérez-Navarrete y col., 2007) se observó que las harinas

procesadas en un extrusor Brabender a 160°C, 100 rpm, y 15,5% de H, que la digestibilidad in vitro de la proteína fue mayor en los extrudidos (82%) que en las harinas crudas (77%), determinado por el método enzimático/potenciométrico propuesto por Hsu y col. (1977).

La digestibilidad proteica es un indicador de la calidad de las proteínas, siendo los alimentos de origen animal los que presentan mayor digestibilidad. El mayor contenido de fibra cruda de los alimentos de origen vegetal, haría que la velocidad de tránsito intestinal sea mayor y como consecuencia, se obtendría una menor absorción de nutrientes. Además, la estructura terciaria de las proteínas animales es menos compleja que la de los vegetales, por lo que es más fácilmente digerida por las enzimas gastrointestinales. Otros factores que disminuyen la digestibilidad proteica de los alimentos de origen vegetal son algunos componentes tóxicos, tales como los inhibidores de proteasas, taninos y hemaglutininas. De ahí, la necesidad de emplear tratamientos térmicos para su cocción, que pueden afectar la disponibilidad de los aminoácidos, ya que éstos pueden interactuar con los carbohidratos que abundan en los alimentos de origen vegetal (Hernández y col., 1984).

#### **4.5 Conclusiones acerca de las propiedades nutricionales**

El proceso de extrusión estuvo asociado a una disminución en el contenido de taninos, compuestos fenólicos y fitatos. En los dos primeros casos, esta disminución estaría relacionada con una menor extracción de estos compuestos ocasionada por la interacción con componentes de la matriz o con su destrucción, ambas producidas por las condiciones de alta temperatura y fricción generadas en la extrusión. La

disminución del contenido de fitatos está relacionada con la hidrólisis del ácido fítico, con la generación de fosfatos libres y formas de inositol fosfato con menor contenido de fósforo.

Teniendo en cuenta los resultados observados respecto a los efectos de las variables de extrusión (T y H) para el contenido de fenoles totales, taninos, fitatos y CAO en sorgo, en general, el aumento de la H de extrusión se asoció a una menor extracción de estos compuestos y una menor CAO.

La muestra seleccionada por sus buenas características sensoriales y propiedades físicas presentó valores altos de taninos, de polifenoles y la mayor CAO y valores intermedios de pérdida de fitatos en relación con las muestras obtenidas en las otras condiciones.

Respecto a las características nutricionales del producto seleccionado, la lisina disponible fue menor que la muestra de partida (se redujo un 25,4%) ya que las condiciones de H y T que habitualmente se utilizan en los procesos de extrusión favorecen las reacciones de Maillard, generando un efecto negativo sobre la disponibilidad de los aminoácidos.

En contrapartida con este efecto negativo, se encontró un aumento de la digestibilidad proteica de un 31% respecto a la muestra sin extrudir.

Del análisis de los resultados de aporte de Fe y Zn, se observó que la extrusión aumentó el aporte potencial para el Fe y lo disminuyó para el Zn.

Debido a que se trata de un producto a base de grano entero, el aporte de fibra resultó interesante.

## 5. Conclusiones Finales

El volumen específico, que es considerado el mejor indicador del grado de cocción aumentó con el aumento de la temperatura (T) y la disminución de la humedad (H).

La muestra extrudida de mayor dureza sensorial y mecánica resultó ser la de menor grado de cocción: 164°C y 19% H y por su parte la más blanda fue la de mayor grado de cocción, es decir la obtenida a 200°C y 14%H. La dureza sensorial se relacionó de manera inversa con el grado de cocción. También se observó una relación inversa entre la dureza mecánica y el consumo específico de energía mecánica lo cual es esperable, ya que a mayor grado de cocción la muestra es más expandida, posee mayor volumen específico y por lo tanto es menos dura.

Acerca de las propiedades nutricionales, el proceso de extrusión produjo una disminución en el contenido de taninos, compuestos fenólicos y fitatos. Del análisis de los efectos de las variables de extrusión (T y H) se observa, en general, que el aumento de la H de extrusión produjo una menor extracción de estos compuestos y una menor capacidad antioxidante.

Considerando el análisis de todas las características fisicoquímicas y sensoriales de las diferentes muestras extrudidas conjuntamente con las propiedades de hidratación de sus respectivas harinas, se puede concluir que la extrusión de sorgo integral a 182°C de T y 14% de H permitió obtener una muestra con buenas características de expansión y volumen específico.

El análisis de las características nutricionales de la muestra seleccionada presentó valores altos de taninos, de polifenoles y la mayor CAO y valores intermedios de pérdida de fitatos, en relación con las muestras obtenidas en las otras condiciones. Por su parte, el valor de lisina disponible fue menor que el de la muestra de partida; no obstante la muestra extrudida presentó un 31% de aumento de la digestibilidad proteica respecto a la muestra sin extrudir. Esta muestra extrudida presentó mayor aporte potencial de Fe y menor aporte potencial de Zn que la muestra sin extrudir y un aporte interesante de fibra, considerando que se trata de un producto a base de grano entero.

Estos resultados demuestran que es posible obtener un producto extrudido a base de grano de sorgo entero apto para el consumo, particularmente para la población celíaca.

## 6. Bibliografía

- Abd El Hady EA and Habibi RA. (2003). Effect of soaking and extrusion conditions on antinutrients and protein digestibility of legume seeds. *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.* 36, 285-293.
- Abd Karim A, Norziah MH and Seow CC. (2000). Methods for the study of starch retrogradation (Review). *Cereal Chem.* 71, 9-36.
- Acosta-Sanchez D. (2003). White food-type sorghum in direct expansion extrusion applications. M.S. Thesis. Texas A&M University: College Station, TX.
- Alonso R, Rubio LA, Muzquiz M and Marzo F. (2001). The effect of extrusion cooking on mineral bioavailability in pea and kidney bean seed meals. *Animal Feed Sci Tech.* 94, 1-13.
- Anderson RA, Conway HF, Pfeifer VF and Griffin EL. (1969). *Cereal Sci Today.* 14, 4.
- Antón AA, Gary Fulchera R and Arntfielda SD. (2009). Physical y nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *Food Chem.* 113 (4), 989-996.
- AOAC. (1993). Method 931-01- Methods of Analysis for Nutrition Labelling. Ed. Sullivan DM, Carpenter DE, cap 26, 331-365.
- AOAC. (2002). Official Methods of Analysis, 17th ed. Horwitz W Ed Washington, DC.
- Apró N, Rodríguez J y Gornatti C. (2000). La extrusión como tecnología flexible de procesamiento de alimentos. *Jornadas de Desarrollo e innovación 2000.*
- Asp N, Björck I. Nutritional properties of extruded foods. En: Mercier C., Linko P., Harper J, editors, *Extrusion Cooking.* Minnessota: AACC; 1989. p. 399-433.

- Awika JM, Dykes L, Gu L, Rooney LW and Prior RL. (2003a). Processing of sorghum (sorghum bicolor) and sorghum products alters procyanidin oligomer y polymer distribution and content. *J Agric Food Chem.* 51, 5516-5521.
- Awika JM, Dykes L, Gu L, Rooney LW and Prior RL. (2003b). Processing of sorghum (*Sorghum bicolor*) y sorghum products alters procyanidin oligomer and polymer distribution and content. *J Agric Food Chem.* 51, 5516-5521.
- Awika JM, Rooney LW, Wu X, Prior RL and Cisneros-Zevallos L. (2003). Screening Methods To Measure Antioxidant Activity of Sorghum (*Sorghum bicolor*) y Sorghum Products. *J Agric Food Chem.* 51 (23), 6657-6662.
- Awika JM. (2000). Sorghum phenols as antioxidants. M.S. Thesis. Texas A&M University: College Station, TX.
- Ayyat MM Youssef, Bolling H, Moustafa EK and Moharram YG. (1988). Extraction, determination y fractionation of sorghum polyphenols. *Cereal Chem.* 30 (2), 103-111.
- Barberá R, Farré R. (1992). Revisión: Biodisponibilidad de los elementos trazas. *Ciencia y Tecnología de Alimentos.* 32 (4), 381-399.
- Batista KA, Prudêncio SH and Fernandes KF. (2010). Changes in the Functional Properties and Antinutritional Factors of Extruded Hard-to-Cook Common Beans (*Phaseolus vulgaris*, L.). *J Food Sci.* 75, 286–290.
- Batista, JC. (2010). Buscando aumentar la competitividad del Sorgo Argentino. Nueva norma de Comercialización. IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, Rosario 17-19 de noviembre de 2010.
- Björck I and Asp NG. (1983). The effects of extrusion cooking on nutritional value - a literature review. *J Food Eng.* 2, 281-308.

- Björck I, Asp NG and Dahlqvist A. (1984). Protein nutritional value of extrusion-cooked wheat flours. *Food Chem.* 15 (3), 203-214.
- Blanshard and Bowler. (1987). Morphology and composition of starch. En *Starch: Properties and Potential*. Ed T Galliard. Critical Reports on Applied Chemistry John Willey & Sons Chichester-GB. 3, 64.
- Booth VH. (1971). Problems in the determination of FDNB-available lysine. *J.Sci Food Agric.* 22, 658.
- Butler LG, Riedl DJ, Lebryk DG and Blytt HJ. (1984). Interaction of proteins with sorghum tannin: mechanism, specificity and significance. *J Am Oil Chem Soc.* 61, 916–920.
- Castillo C y Rivas C. (2008). Los costos de una canasta básica de alimentos para celíacos en Chile. *Rev. Méd. Chile.* 136 (5), 613-619.
- Castro A, Marrero LI, Valdivia M, Gabel M y Steingass H. (2002). Contenido de factores antinutricionales del grano de sorgo de cuatro variedades cultivadas en Cuba. *Rev. Cubana Sci Agr.* 36 (1), 31-35.
- Catassi C, Kryszak D, Louis-Jaques O, Duerkesen Dr, Hill I, Crowe Se, Brown AR, Procaccini NJ, Wonderly BA, Hartley P, Moreci J, Bennett N, Horvath K, Burk M and Fasano A. (2007). Detection of Celiac disease in primary care: a multicenter case-finding study in North America. *Am J Gastroenterol.* 102 (7), 1454-60.
- Catassi C, Ratsch IM, Gy olfi L, Pratesi R, Fabiani E, El Asmar R, Frijia M, Bearzi ProfMDb I, Vizzoni ProfMDc L. (1999). Why is coeliac disease endemic in the people of the Sahara? *Lancet.* 354 (9179), 647–648.
- Chen J; Serafín FL; Pandya RN and Daun H. (1991). Effects of extrusion conditions on sensory properties of corn meal extrudates. *J Food Sci.* 56 (1), 84-89.



- Cleveland LE, Moshfegh AJ, Albertson AM and Goldman JD. (2000). Dietary intake of whole grains. *J Am Coll Nutr.* 19, 331–338.
- CODEX. (2006). Solicitud de observaciones sobre el proyecto de plan de acción para la aplicación de la estrategia mundial sobre régimen alimentario, actividad física y salud. CL 2006/44-CAC.
- De La Gueriviere JF, Mercier C and Baudet L. (1985). Incidences de la cuisson-extrusion sur certains parametres nutritionnels de produits alimentaires notammentcéréaliers. *Cah Nutr Diet.* 20 (3), 201–10.
- Dendy D y Dobraszcyk B. (2001). Cereales y Productos Derivados. Química y Tecnología. España: Acribia SA. 17, 312-316,326,423,426.
- Déprez S, Brezillon C, Rabot S, Philippe C, Mila I, Lapierre C and Scalbert A. (2000). Polymeric Proanthocyanidins Are Catabolized by Human Colonic Microflora into Low-Molecular-Weight Phenolic Acids. *J Nutr.* 130, 2733-2738.
- Drago S, Zuleta A, De Greef M, Torres R, González R, Chel Guerrero L, Betancur Ancona D. (2010). Disponibilidad de minerales de extrudidos elaborados con granos enteros de maíz y/o leguminosa (*Phaseolus vulgaris*). Utilización de recursos naturales tropicales para el desarrollo de alimentos. DA. Betancur Ancona, LA. Chel Guerrero, AF. Castellanos Ruelas. Cap16, pp 208-223 Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Drago SR, Binaghi MJ, Valencia ME. (2005). Effect of gastric digestion pH on iron, zinc and calcium availability from preterm and term starting infant formulas. *J Food Sci.* 70 (2), 107-112.
- Drago SR, González RJ, Chel-Guerrero L y Valencia M E. (2007a). Evaluación de la Disponibilidad de Minerales en Harinas de Frijol y en Mezclas de Maíz/Frijol Extrudidas. *Revista Información Tecnológica.* 18 (1), 41-46.

- Drago SR, Velasco González O, Torres RL, González RJ y Valencia ME. (2007b). Effect of the extrusion on functional properties and mineral dialyzability from Phaseolus vulgaris bean flour. *Plant Food Hum Nutr.* 62 (2), 43-48.
- Drago SR; Gonzalez RJ; Torres R; De Greef DM; Freyre MR; Valencia, ME. (2004). Efecto del agregado de promotores en la disponibilidad de Fe, Zn y Ca de texturizado de soja. Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Córdoba, 24-26 de noviembre de 2004.
- Eggum BO, Juliano BO, Ibabao MG and Perez CM. (1986). Effect of extrusion cooking on nutritional value of rice flour. *Food Chem.* 19 (3), 235-240.
- Emmambux NM and Taylor JRN. (2003). Sorghum kafirin interaction with various phenolic compounds. *J Sci Food Agric.* 83, 402-407.
- Enríquez AM. (2004). Extrusión en la industria alimentaria. La Habana, Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia.
- Fachmann W, Kraut H, Souci SW. (1991). Tablas De Composición De Alimentos. El Pequeño «Souci-Fachmann-Kraut». Editorial Acribia, S.A.
- Fairweather-Tait, S.J. (1987). The concept of bioavailability as it relates to iron nutrition. *Nutr Res.* 7, 319-325.
- FAO. (1995). El sorgo y el mijo en la nutrición humana. Colección FAO: Alimentación y nutrición. N° 27 Capítulo 2: Producción y utilización.
- FAO. (1995). El sorgo y el mijo en la nutrición humana. Colección FAO: Alimentación y nutrición. N° 27 Capítulo 4: Composición química y valor nutritivo.
- FAO. (2009). Achieving food security in times of crisis. Página web: [http://www.fao.org/fileadmin/templates/getinvolved/pdf/WFD\\_2009\\_leafletes\\_web\\_01.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/getinvolved/pdf/WFD_2009_leafletes_web_01.pdf)

- FAO/WHO. (1995). Food Standard Programme. Codex Alimentarius Commission: Norma del Codex para la harina de sorgo: Codex Stan 173-1989 (Rev. 1-1995).
- Fasano A, Berti I, Gerarduzzi T, et al. (2003). Prevalence of celiac disease in at-risk and not-at-risk groups in the United States: a large multicenter study. *Arch Intern Med.* 163, 286–292.
- Frazier PH; Crawshaw A; Daniels NWR, Russell Eggitt PW. (1984). Optimization of Process Variables in Extrusion Texturing of Soya. En: *Extrusion Cooking Technology*. Ed: Jowitt, R. Elsevier Applied Science Pub. London. 1- 25.
- Fretzdorff B and Weipert D. (1986). Phytic acid and cereals y cereal products. I: Phytic acid y phytase in rye y rye products. *J Agric Food Chem.* 182 (4), 287-93.
- González RJ, De Greff DM, Torres RL, Robuti J and Borrás F. (2003). Effects of endosperm hardness and extrusion temperature on properties of products obtained with grits from two commercial maize cultivars. *Food Sc and Technology/LwT.* 37, 193-198.
- González RJ, Remondetto GE, Coutas R, Santiago LG y Bonaldo AG. (1995). Efectos de variables del proceso en planta piloto sobre algunas propiedades de aislados proteicos de soja. *Rev Esp Cien Tec Ali.* 35 (1), 77-91.
- González RJ, Torres RL y De Greef. (2002). Extrusión–Cocción de Cereales. *Boletín da Sociedade Brasileira de Ciencia e Tec de Alimentos (sbCTA)*, Campinas. 36 (2), 83-136.
- González RJ, Torres RL, De Greef DM, Gordo NA. (1986). Evaluación de almidón de maíz precocido por extrusión–cocción. *Rev Agroquim Technol Aliment.* 26 (4), 552-564

- González RJ, Torres RL, De Greef DM, Gordo NA. (1987). Aplicación del método de la superficie de respuesta al estudio de la extrusión - cocción de sémola de maíz. *Rev Agroquim Tecnol Aliment.* 27 (2), 251-259.
- González RJ, Torres RL, De Greef DM, Gordo NA. (1987). Efectos de algunas variables de extrusión sobre la harina de maíz. *Arch Latinoam Nutr.* 37 (3), 578-592.
- González RJ. (1988). Aspectos de la Estructura del Sistema Agroalimentario en las Sociedades modernas. *Boletín del I.T.A.- U.N.L.* N° 7, 1-9.
- Guy R. (2001). *Extrusión de los alimentos: tecnologías y aplicaciones.* Editorial Acribia, Zaragoza.
- Hahn DH, Rooney LW and Earp CF. (1984). Tannins and phenols of sorghum. *Cereal Foods World.* 29, 776–779.
- Hahn RR. (1970). Cap 16: Usos del sorgo granífero en la alimentación humana y otros. En: *Producción del Sorgo y su Utilización*, editado por Joseph S. Wall y William M. Ross (USDA, Universidad de Nebraska, Lincoln, Nebraska).
- Hahn RR. (2007). Usos del sorgo granífero en la alimentación humana y otros. Información técnica de cultivos de verano. Campaña 2007. Publicación miscelánea no 108. INTA Estación Experimental Agropecuaria Rafaela
- Haller AD. (2008). Evaluación de las condiciones de extrusión necesarias para elaborar harina de maíz con características similares a las de una harina nixtamalizada. Tema de Tesis para el Magister de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la F.I.Q. -U.N.L Septiembre.
- Hamaker BR, Mertz ET and Axtell JD. (1994). Effect of extrusion on sorghum kafirin solubility. *Cereal Chem.* 71, 515–517.

- Harland BF and Oberleas D. (1986). Anion exchange method for determination of phytate in food. *J Assoc Off Ana Chem.* 69, 667–670.
- Harnack L, Walters SH and Jacobs DR Jr. (2003). Dietary intake and food sources of whole grains among US children y adolescents: data from the 1994–1996 Continuing Survey of Food Intakes by Individuals. *J Am Diet Assoc.* 103, 1015–1019.
- Harper JM. (1981). *Extrusion Food*. CRC. Press. Boca Ratón, Florida. 127-163.
- Harper JM. (1989). Food extruders and their applications. En: *Extrusion Cooking*. Mecier, C; Linko, P; Harper, J.M. editors. American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota, USA. 1-15.
- Harper JM. (1992). A Comparative analysis of single and twin screw extruders. En: *Food extrusion Sc. and technology*. Ed: Kokini J. L. Ho Ch.T.and Karwe M. Marcel Dekker Inc New York. V. 8: 139-148.
- Hazell T and Johnson IT. (1987). Effects of food processing and fruit juices on in vitro estimated iron availability from cereals, vegetables y fruits. *J Sc Food Agric.* (38), 73-82.
- Hazell T y Johnson IT. (1989). Influence of food processing on iron availability in vitro from extruded maize-based snack foods. *J Sc Food Agric.* 46 (3), 365-374.
- Hernández M, De la Vega A y Sotelo A. (1984). Determinación de la Digestibilidad Proteinica in vitro e in vivo en Cereales y Leguminosas Crudos y Cocidos. *ALAN.* 24 (3), 515-522.
- Hoseney RC. (1986). *Cereal Starch*. Capítulo 2. *Principles of Cereal and Technology*. American Association of Cereal Chemits, inc. St. Paul, Minnesota, USA. 1-31.
- Hoseney RC. (1991). *Principios de Ciencia y Tecnología de Cereales*. España: Acribia S.A. 21, 25, 148, 269-271.

- Hsu HD, Vavak L, Satterlee and Miller G. (1977). A multienzyme technique for estimating protein digestibility. *J Food Sci.* 42, 1269-1279.
- Hulse JH, Laing EM and Pearson OE. (1980). *Sorghum and the millets: their composition and nutritive value.* New York, Academic Press. 997.
- Hurrel RF. (1997). Bioavailability of iron. *Eur J Clin Nutr. Suppl* 1, 84-88.
- ISO. (1988). Norma Internacional para la Determinación de Taninos. N° 9648.
- King JC, Donangelo MC, Woodhouse LR, Mertz SD, Shames MD, Viteri FE; Cheng Z and Welch RM. (2000). Measuring iron and zinc bioavailability in humans. *Food Nutr Bull.* 21 (4).
- Kokini JL, Chang CN, and Lai LS. (1992). The rol of rheological properties on extrudate expansion. In: J.L. Kokini, C.T. Ho, y M.V. Karwe (Eds.). *Food Extrusion Science and Technology.* New York: Marcel Dekker. 631-652.
- Konstance RP, Onwulata CI, Smith PW, Lu D, Tunick MH, Strange ED, and Holsinger VH. (1998). Nutrient-based Corn and Soy Products by Twin-screw Extrusion. *J Food Sci.* 63, (5).
- Lai L and Kokini J. (1991). Physicochemical and rheological of starch during extrusion (a review). *Biotechnol Progress.* 7 (3), 251-266.
- Lassa MS. (2008). Evaluación de las Propiedades Físicas y Disponibilidad de Minerales de Expandidos Fortificados, Elaborados en Base a Maíz y Soja. Tema de Tesis para el Magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Instituto de Tecnología de Alimentos. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional del Litoral.
- Le Francois P. (1988). Phytic acid and zinc contents of cereal products: relation to the manufacturing process. *J Food Compos Anal.* 1, 139–145.
- Liu R. (2007). Whole grain phytochemicals and health. *J Cereal Sci.* 46, 207-219.

- Lohi S, Mustalahti K, Kaukinen K, et al. (2007). Increasing prevalence of celiac disease over time. *Aliment Pharmacol Ther.* 26,1217-1225.
- Machado Alcolea A, Novella Leyva R, Torres García S, Martín Fagundo D, Leyva O. (2005). Comportamiento de los índices anatómicos y fisiológicos de tolerancia a la sequía en variedades de sorgo (*Sorghum bicolor* L.). *Centro Agrícola.* 32 (1), 77-81.
- Macleán WC, De Romana GL, Gastanaduy A, Graham GG. (1983). The effect of decortication and extrusion on the digestibility of sorghum by preschool children. *J Nutr.* 113, 2171–2177.
- Maki M, Mustalahti K, Kokkonen J, et al. (2003). Prevalence of celiac disease among children in Finland. *N Engl J Med.* 348, 2517–2524.
- Maroulis ZB, Thymi S, Krokida MK and Pappa A. (2004). Structural properties of extruded corn starch. *J Food Eng.* 68 (4), 519-526.
- Martínez BF y Pau CL. (1992). Extrusión de sorgo integral y decorticado. *Agron Mesoam.* 3, 40-44.
- Mason WR and Hosney RC. (1986). Factor affecting the viscosity of extruded cooked wheat starch. *Cereal Chem.* 63, 436-441.
- Massigoge J, Zamora M y Melín A. (2009). Agromercado, Cuadernillo de Sorgo N° 154. Evaluación del contenido de taninos en granos de híbridos de sorgo. 14-15.
- Méndez E, Vela C, Immer U and Janssen FW. (2005). Report of a collaborative trial to investigate the performance of the R5 enzyme linked immunoassay to determine gliadin in gluten-free food. *Eur J Gastroen-terol Hepatol.* 17, 1053-63.
- Miller DD and Berner LA. (1989). Is solubility in vitro a reliable predictor of iron bioavailability. *Biol Trace Elem Res.* 19, 11-24.

- Miller DD, Schricker BR, Rasmussen RR and Van Campen D. (1981). An in vitro method for the estimation of iron availability from meals. *Am J Clin Nutr.* 34, 2248-2256.
- Miller G, Prakash A, Decker E. (2002). Whole-grain micronutrients. In: *Whole Grain Foods in Health and Disease*, Marquart L, Slavin JL, Fulcher RG, Eds, Eagan Press, St. Paul, MN, 243-260.
- Mitchell JR and Areas JAG. (1992). Structural changes in biopolymers during extrusion. In: Kokini JL, Ho CT, Karwe MV, editors. *Extrusion Cooking Science and Technology*. New York: Marcel Dekker Inc. 349-360.
- Mora M, Litwin N, Toca M, Azconan M, Neffa R, Ortiz G, Wagener M, Olivera J, Rezzónico G, Marchisone S, Oropeza G, Bastianelli C, Solaegui M, González M y Battiston F. (2010). Prevalencia de Enfermedad Celíaca: estudio multicéntrico en población pediátrica en cinco distritos urbanos de Argentina. *Rev Argent Salud Pública.* 4, 26-32.
- Ngwenya NR. (2007). Effect of sorghum type and processing on the antioxidant properties of sorghum [*sorghum bicolor* (L.) moench] based foods. Thesis for Doctor of Philosophy. Texas A&M University.
- Ojeda A, Frías A, González R, Linares Z y Pizzani P. (2010). Contenido de taninos, fósforo fítico y actividad de fitasas en el grano de 12 híbridos de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L) Moench). *Arch Latinoam Nutr.* 60 (1), 93-98.
- Padilla FC, Rincón AM y Bou-Rached L. (2008). Contenido de polifenoles y actividad antioxidante de varias semillas y nueces. *Arch Latinoam Nutr.* 58 (3), 303-308.
- Penichet Cortiza M, Darias González M, Saucedo Castillo O y Guerra Garcés M. (2009). El sorgo en la alimentación de niños celíacos: una alternativa, en *Contribuciones a las Ciencias Sociales*. [www.eumed.net/rev/cccss/04/cgcg.htm](http://www.eumed.net/rev/cccss/04/cgcg.htm)



- Pérez A, Drago S, Carrara C, De Greef D, Torres R y González R. (2008). Extrusion cooking of a maize/soybean mixture: Factors affecting expanded product characteristics and flour dispersion viscosity. *J Food Engin.* 87, 333–340.
- Pérez-Navarrete C, Betancur-Ancona D, Casotto M, Carmona A y Tovar J. (2007). Efecto de la extrusión sobre la biodisponibilidad de proteína y almidón en mezclas de harinas de maíz y frijol lima. *Arch Latinoam Nutr.* 57, 3.
- Pérez-Navarrete C, González R, Chel-Guerrero L and Betancur-Ancona D. (2006) Effect of extrusion on nutritional quality of maize and lima bean flour blends. *J Sci Food Agric.* 86, 2477-2484.
- Politz M, Timpa J and Wasserman B. (1994). Quantitative measurement of extrusion-induced starch fragmentation products in maize. Flour using nonaqueous automated gel-permeation chromatography. *Cereal Chem.* 71 (6), 532-536.
- Price ML, Van Scoyoc S and Butler LG. (1978). A critical evaluation of the vanillin reaction as an assay for tannin in sorghum grain. *J Agric Food Chem.* 26, 1214-1218.
- Pukalskas A, Van Beek T, Venskutonis R, Linssen J, Van Veldhuizen A and De Groot AE. (2002). Identification of Radical Scavengers in Sweet Grass (*Hierochloe odorata*). *J Agric Food Chem.* 50, 2914-2919.
- Ragae S, Abdel-Aal EM, Noaman M. (2006). Antioxidant activity and nutrient composition of selected cereals for food use. *Food Chem.* 98 (1), 32-38.
- Remy S, Fulcrand H, Labarbe B, Cheynier V y Moutounet M. (2000). First confirmation in red wine of products resulting from direct anthocyanin-tannin reactions. *J Sci Food Agric.* 80, 745-751.
- Richardson D. (2003). Wholegrain health claims in Europe. *P Nutr Soc.* 62, 161-169.

- Riedl KM and Hagerman AE. (2001). Tannin-protein complexes as radical scavengers y radical sinks. *J Agric Food Chem.* 49, 4917-4923.
- Robb P, Williams DR y Mcweeny, D.J. (1986). Predicted chemical speciation of essential metals in digested food. *Inorg Chim. Acta* 125:207-212.
- Robertfroid MB. (2000). Defining functional foods. En: *Functional foods. Concept to product.* Ed. Glenn R. Gibson y Christine M. Williams, Cap. 1, 9-25. CRC Press, Washinngton DC.
- Robutti JL, Borrás FS, González RJ, Torres RL y De Greef DM. (2002). Endosperm properties and Extrusion cooking behaviour of maize cultivars. *Lebensm Wiss Technol.* 35, 663-669.
- Rooney LW and Miller FR. (1982). Variation in the structure y kernel characteristics of sorghum. Pages 143-162 in: Rooney, L. W. & Murty, D. S. (Eds.). *Proceedings of the International Symposium on Sorghum Grain Quality.* October 28-31, 1981, Patancheru, AP India. ICRISAT.
- Rooney LW. (2004). *Cereal Grains Lecture.* Cereal Grains. Texas A&M University: College Station.
- Rudiger C. (2003). The formulation of a nutraceutical bread mix using sorghum, barley, and flaxseed. M.S. Thesis, Texas A&M University, College Station, TX.
- Rudloff S and Lönerdal B. (1992). Solubility y digestibility of milk proteins in infant formulas exposed to different heat treatments. *J Pediatr Gastr Nutr.* 15, 25-33.
- Sandberg AS and Svanberg U. (1991). Phytate Hydrolysis by Phytase in Cereals; Effects on in Vitro Estimation of Iron Availability. *J Food Sci.* 56 (5), 1330-1333.
- SENASA. (2011). *SANIDAD VEGETAL.* Resolución 554/2011. Norma de Calidad para la Comercialización de Sorgo. Modifíquese la Resolución N° 1075/94.

- Serna-Saldivar S and Rooney LW. (1995). Structure and chemistry of sorghum and millets. Pages 69-124 in: Sorghum and Millets: Chemistry and Technology. D. A. Dendy, ed. Am Assoc Cereal Chem: St. Paul, MN.
- Serna-Saldivar SO and Rooney LW. (1995). Structure and chemistry of sorghum and millet. Structure y chemistry of sorghum and millet. AACC, St. Paul, Minnesota. 69-124.
- Shewry PR and Halford NG. (2002). Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *J Exp Biol.* 53, 947-58.
- Singleton VL, Orthofer R and Lamuela-Raventos RM. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of the Folin–Ciocalteu reagent. *Meth Enzymol.* 299, 152–178.
- Slavin JL. (2005). Dietary fiber and body weight. *Nutr.* 21, 411-418.
- Taylor JRN and Schussler L. (1986). The protein compositions of the different anatomical parts of a sorghum grain. *J Cereal Sci.* 4, 361-369.
- Taylor JRN, Bean S, Loerger B and Taylor J. (2007). Preferential binding of sorghum tannins with g-kafirín y the influence of tannin binding on kafirín digestibility and biodegradation. *J Cereal Sci.* 46, 22–31.
- Torgensen H and Toledo RT. (1977). Physical properties of protein preparations related to their functional characteristics in comminuted meat systems. *J Food Sci.* 42, 1615–1620.
- Torres RL. (2005). Estudio de las características fisicoquímicas de diferentes genotipos de maíz y su comportamiento durante la extrusión termoplástica. Tesis para el Magister de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la F.I.Q. - U.N.L.

- Turner DL. (2004). The use of specialty sorghums for extruded snack food processing. Thesis for Master of Science. Texas A&M University.
- Ummadi P, Chenoweth WL and Uebbersax MA. (1995) The influence of extrusion processing on iron dialyzability, phytates and tannins in legumes. *J Food Process Pres.* 19, 119-131.
- USDA. (2007). USDA Pronostica Altos Precios Agrarios Durante los Próximos 10 años. Puede consultarse en la siguiente página web: <http://www.biodieselspain.com/2007/02/27/el-usda-pronostica-altos-precios-agrarios-durante-los-proximos-10-anos/>
- Van Heel DA and West J. (2006). Recent advances in celiac disease. *Gut.* 55, 1037-46.
- Vargas R, Santiago R y Patiño M. (2008). Diseño y Construcción de un Controlador de Temperatura Programable para una Máquina Extrusora. *Rev Colomb Fís.* 40 (2), 385-387.
- Vitali D, Vedrinaro Dragojević I and Sebecić B. (2008). Bioaccessibility of Ca, Mg, Mn y Cu from whole grain tea-biscuits: Impact of proteins, phytic acid and polyphenols. *Food Chem.* 110, 62-68.
- Volta U and Villanacci V. (2011). Celiac disease: diagnostic criteria in progress. *Cell Mol Immunol.* 8, 96–102.
- Volta U, Bellentani S, Bianchi FB, Brandi G, De Franceschi L, Miglioli L y col. (2001). High prevalence of celiac disease in Italian general population. *Dig Dis Sci.* 46, 1500–1505.
- Walker AF. (1983). The estimation of protein quality. In *Development of Food Proteins -2* B.J.F. Hudson (Ed.). Applied Science, New York. 293-323.

- Walter T, Pizarro F, Abrams S and Boy E. (2004). Bioavailability of elemental iron powder in white wheat bread. *Eur J Clin Nutr.* 58 (3), 555-5558.
- Wastke JH. (1998). Impact of processing on bioavailability examples of minerals in food. *Food Sci Technol.* 9: 320-327.
- Wayne Smith C. (2000). *Sorghum: origin, history, technology, and production.* New York: John Wiley & sons.
- Wolfgor R, Drago SR, Rodríguez V, Pellegrino N and Valencia M. (2002). In vitro measurement of available iron in fortified foods. *Food Res Int.* 35, 85-90.
- Zielinski H and Kozowska H. (2000). Antioxidant activity and total phenolics in selected 363 cereal grains and their different morphological fractions. *J Agric Food Chem.* 48, 2008-2016.