

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS



Control y mejora de la panificación de masas bajas en harina de trigo

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

FRANCISCO VÁSQUEZ LARA

Directores académicos:

Raúl Grau Meló

José Manuel Barat Baviera

Marzo de 2016

Dedicatoria

A personas que no veo... pero que siempre están muy cerca...

- ❖ *A mis padres: Ana Gloria (QEPD) y Francisco (QEPD)*
- ❖ *A mi hermana: Belem Imelda (QEPD)*

A mi familia, el motor de todos mis logros...

- ❖ *A mi esposa: Tita*
- ❖ *A mis hijos: Ana Elizabeth e Iván Francisco*

A mis hermanos, siempre el soporte de mis logros, muy cerca de mí...

- ❖ *Flora Oralia y Elizabeth*
- ❖ *Abraham*

A toda mi familia, lo mejor siempre ha sido tenerlos...

No desistas

*Cuando vayan mal las cosas, como a veces suelen ir,
cuando ofrezca tu camino sólo cuestas a subir,
cuando tengas poco haber, pero mucho que pagar,
y precisas sonreír, aún teniendo que llorar;
cuando el dolor te agobie, y no puedas ya sufrir,
descansar acaso debas, pero nunca desistir.*

*Tras las sombras de las dudas, ya plateadas, ya sombrías,
puede bien surgir el triunfo, no el fracaso que temías.
Y no es dable a tu ignorancia figurarse cuán cercano,
puede estar el bien que anhelas, y que juzgas tan lejano.*

*Lucha, pues, por más que en la brega tengas que sufrir,
cuando todo esté peor, más debemos insistir.*

Joseph Rudyard Kipling

Agradecimientos

Al fin el anhelado grado, después de mucho trabajo, estar tan lejos de la familia y amigos se obtiene el fruto de todo esto. Un fruto en el cual muchas personas trabajamos para su buena maduración, la suma de participaciones y esfuerzos siempre da resultados. Muy gratos resultados...

- ❖ En primer lugar, un agradecimiento muy especial a mis tutores de tesis Raúl Grau y José Manuel Barat por la confianza que han tenido hacia mí, así como la dedicación que siempre mostraron al trabajo realizado. Importantes sugerencias, guía y apoyo para enriquecer el trabajo fueron las recibidas por ellos, sobre todo de Raúl que siempre estuvo al pendiente de nuestro trabajo, gracias de corazón.*
- ❖ A todos los compañeros del laboratorio (CUINA) por el afecto recibido durante estos años, de verdad me han hecho sentir como en casa, no menciono nombres para no cometer el error de dejar de mencionar a alguien, todos sin excepción son grandes personas, siempre tendrán un lugar muy especial en mí. No puedo dejar de mencionar a Samu, Esteban y Rafa por todo el tiempo que hemos*

convivido dentro del laboratorio, que nos ha servido para forjar una gran amistad, son mucho más que amigos...

- ❖ A toda mi familia, a todos esos seres que siempre están conmigo, que siempre los tengo cerca aunque no los vea, que siempre me han mostrado su apoyo, cariño y confianza.... Son lo más importante para mí.*

- ❖ Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., en Hermosillo, Sonora, México por darme el permiso y apoyo para desarrollar este grado y muy especialmente a su Director Dr. Pablo Wong González. También a la Dra. Alma Rosa Islas Rubio Directora de la Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal, una gran persona que siempre me ha mostrado su apoyo.*

- ❖ A Fundación Carolina en convenio con la Universidad Politécnica de Valencia y con la Secretaría de Relaciones Exteriores de México por recibir el apoyo económico para poder desarrollar este proyecto. Además, al Instituto de Becas y Estímulos Educativos del Estado de Sonora por su apoyo económico.*

RESUMEN

RESUMEN

El alto consumo de alimentos producidos a base de harina de trigo genera muy frecuentemente inestabilidad en los costos del grano que son regidos por mercados internacionales, aunado a esto el déficit en producción que tienen los países. Es por ello que surge la necesidad de utilizar harinas compuestas, en las que se mezclan granos de trigo con otros cereales que normalmente son de bajo costo con respecto a oleaginosas o leguminosas. Es por ello que en el estudio se plantea el estudiar el control y mejora de la panificación de masas bajas en harina de trigo mediante la sustitución parcial de la harina de trigo con harinas de avena, maíz y sorgo. Para ello, en un primer capítulo se han caracterizado las harinas, para así en un segundo capítulo estudiar la panificación utilizando harina de trigo sustituida parcialmente por harina de avena, maíz o sorgo, en una proporción de sustitución del 2.5, 5, 7.5 o 10%. Finalmente en un tercer capítulo se han modificado las características de las harinas de avena, maíz y sorgo para incidir sobre su capacidad panificadora. Para ello se han aplicado tratamientos térmicos sobre éstas a 80, 100 y 130°C durante 30 minutos y dados los resultados del capítulo II a un nivel de sustitución del 10 y 20%. Los resultados del capítulo I han evidenciado como de los parámetros evaluados, la mayor carga proteica de la harina de trigo y de avena es el factor más influyente en el comportamiento de estas, si bien en el caso de la harina de avena también lo es su mayor grado lipídico. En cambio para la harina de maíz lo es su alto contenido en carbohidratos, mientras que para la de sorgo es la materia mineral (cenizas) y su mayor tamaño de partícula. En el capítulo II la formulación binaria de harinas, harina de trigo sustituida parcialmente por las harinas en estudio, ha mostrado como salvo en el caso del uso de harina de sorgo, se podría realizar una sustitución parcial de la harina de trigo por harina de avena o maíz hasta el 10% sin que un panel de catadores evidencie diferencias en la apreciación global. Finalmente en el capítulo III se ha podido concluir que el tratamiento térmico es muy interesante cuando la sustitución se realiza con harina de avena dado que se alcanzan rendimientos similares a los obtenidos cuando se usa solo harina de trigo a un nivel de sustitución del 20%. Para la harina de sorgo también es interesante dado que

permite usar niveles de sustitución de hasta el 10%, pero en cambio para la harina de maíz el tratamiento no mejora la apreciación de los panes siendo evaluados favorablemente hasta un 10% independientemente de la aplicación del tratamiento térmico.

ABSTRACT

High consumption of foods manufactured from wheat flour very often generates instability in grain costs are governed by international markets, coupled with this production deficit with countries. That is why the need for composite flours, which wheat grains are mixed with other grains that are normally inexpensive compared to oilseeds or legume. That is why the study raises the study the control and improvement of low mass bread wheat flour with partial substitution of wheat flour with oat flour, corn and sorghum. Therefore, in a first chapter has characterized flour, thus a second chapter study baking using wheat flour partially replaced by oat flour, corn or sorghum, in a ratio of substitution of 2.5, 5, 7.5 or 10%. Finally in a third chapter we have changed the characteristics of oat flour, maize and sorghum to influence his bakery capacity. For this heat treatments have been applied on them at 80, 100 and 130°C for 30 minutes and given the results of chapter II to a level of substitution of 10 to 20%. The results of chapter I are shown as of the parameters evaluated, the higher protein load of wheat flour and oats are the most influential on the behavior of these factor, although in the case of oats so is his lipid greater degree. In contrast to the corn flour its high carbohydrate content, while for sorghum is the mineral matter (ash) and its larger particle size. In chapter II the binary formulation of flour, wheat flour partially substituted for flour in the study, it has proven the exception of using sorghum flour, one could make a partial substitution of wheat flour oats or corn to 10% without a panel of tasters evidencing differences in the overall assessment. Finally in chapter III it has been able to conclude that the thermal treatment is very interesting when the substitution is made with oatmeal because similar yields are achieved to those obtained when only wheat flour is used, a replacement level of 20%. For sorghum flour it is also interesting because it allows use replacement levels up to 10%, but instead for corn flour treatment does not improve the appreciation of the loaves being evaluated favorably to 10% regardless of the application of heat treatment.

RESUM

L'alt consum d'aliments produïts a força de farina de blat generen molt freqüentment inestabilitat en els costos del gra que són regits per mercats internacionals, unint a això el dèficit en producció que tenen els països. És per això que sorgeix la necessitat d'utilitzar farines compostes, en què es barregen grans de blat amb altres cereals que normalment són de baix cost respecte a oleaginoses o lleguminoses. És per això que en l'estudi es planteja l'estudi del control i millora de la panificació de masses baixes en farina de blat mitjançant la substitució parcial de la farina de blat per farines d'avena, dacsca i sorgo. Per això, en un primer capítol s'han caracteritzat les farines, per així en un segon capítol estudiar la panificació utilitzant farina de blat substituïda parcialment per farina d'avena, dacsca o sorgo, en una proporció de substitució del 2.5, 5, 7.5 o 10%. Finalment en un tercer capítol s'han modificat les característiques de les farines d'avena, dacsca o sorgo per incidir sobre la seva capacitat panificadora. Per això s'han aplicat tractaments tèrmics sobre aquestes a 80, 100 i 130°C durant 30 minuts i donats els resultats del capítol II a un nivell de substitució del 10 i 20%. Els resultats del capítol I han evidenciat com dels paràmetres avaluats, la major càrrega proteica de la farina de blat i d'avena és el factor més influent en el comportament d'aquestes, si bé en el cas de la farina d'avena també ho és el major grau lipídic. En canvi per a la farina de dacsca ho és el seu alt contingut en carbohidrats, mentre que per a la de sorgo és la matèria mineral (cendres) i la seva major grandària de partícula. En el capítol II, la formulació binària de farines, farina de blat substituïda parcialment per les farines en estudi, s'ha mostrat com excepte en el cas de l'ús de farina de sorgo, es podria realitzar una substitució parcial de la farina de blat per farina d'avena o dacsca fins al 10% sense que un panell de tastadors evidencii diferències en l'apreciació global. Finalment en el capítol III s'ha pogut concloure que el tractament tèrmic és molt interessant quan la substitució es realitza amb farina d'avena atès que s'assoleixen rendiments similars als obtinguts quan s'usa només farina de blat, a un nivell de substitució del 20%. Per a la farina de sorgo també és interessant atès que permet usar nivells de substitució de fins al

10%, però en canvi per la farina de dacsa el tractament no millora l'apreciació dels pans sent avaluats favorablement fins a un 10% independentment de l'aplicació de tractament tèrmic.

ÍNDICE GENERAL

	Página
Resumen	III
Abstract	V
Resum	VII
INTRODUCCIÓN	3
Los cereales	3
Estructura de los cereales	3
Valor nutritivo	4
Importancia en la alimentación humana	6
Industrialización de los cereales	8
Industrialización del trigo	8
Industrialización de la cebada	10
Industrialización del maíz	11
Industrialización del sorgo	13
Industrialización de avena	14
El pan	15
Proceso de panificación	16
Mercado de cereales implicados en estudio	18
BIBLIOGRAFÍA	21
OBJETIVO GENERAL	27
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN DE LAS HARINAS DE LOS CEREALES A ESTUDIO: TRIGO, AVENA, MAÍZ Y SORGO.	
INTRODUCCIÓN	33
MATERIALES Y MÉTODOS	37
Materias primas	37
Caracterización de las harinas	37
Composición química	37
Distribución del tamaño de partícula (DTP)	37
Determinación de color	38
Capacidad de retención de agua (CRA)	38
Análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA)	38

Análisis estadístico	40
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
Composición química	41
Distribución del tamaño de partícula (DTP)	43
Determinación de color	45
Capacidad de retención de agua (CRA)	46
Análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA)	48
Análisis multivalente de componentes principales (PCA) del conjunto de todas las variables	54
CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	59
CAPÍTULO II. ESTUDIO DE LA PANIFICACIÓN UTILIZANDO HARINA DE TRIGO SUSTITUIDA PARCIALMENTE POR HARINA DE AVENA, MAÍZ O SORGO.	
INTRODUCCIÓN	69
MATERIALES Y MÉTODOS	73
Materias primas	73
Caracterización de las mezclas binarias de harinas	73
Distribución del tamaño de partícula (DTP)	73
Determinación de color de las harinas	73
Capacidad de retención de agua (CRA)	73
Análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA)	73
Análisis de las masas	73
Fuerza (F), extensibilidad (E) y trabajo de deformación (TD)	73
Capacidad fermentativa	74
Análisis en pan	75
Elaboración	75
Pérdida de peso durante el horneado	75
Análisis del perfil de textura (TPA, Texture Profile Analysis)	75
Actividad de agua (a_w)	76
Determinación de color de las migas	76
Análisis sensorial	76

Análisis estadístico	77
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
Caracterización de las mezclas binarias de harinas	79
Distribución del tamaño de partícula (DTP)	79
Determinación de color de las harinas	81
Capacidad de retención de agua (CRA)	83
Análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA)	85
Análisis de las masas	93
Fuerza (F), extensibilidad (E) y trabajo de deformación (TD)	93
Capacidad fermentativa	96
Análisis en pan	97
Pérdida de peso durante el horneado	97
Análisis del perfil de textura (TPA, Texture Profile Analysis)	98
Actividad de agua (a_w)	102
Determinación de color de las migas	104
Análisis sensorial	106
CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	111
CAPÍTULO III. MODIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS HARINAS DE AVENA, MAÍZ Y SORGO PARA INCIDIR SOBRE SU CAPACIDAD PANIFICADORA.	
INTRODUCCIÓN	121
MATERIALES Y MÉTODOS	123
Tratamiento térmico de las harinas	123
Preparación de las mezclas de harinas	123
Caracterización de las harinas	123
Distribución del tamaño de partícula (DTP)	123
Determinación de color	123
Capacidad de retención de agua (CRA)	123
Análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA)	123
Análisis en masas	124
Elaboración de la masa	124
Capacidad fermentativa	124

Análisis en pan	124
Elaboración de pan y pérdida de peso durante el horneado	124
Análisis de envejecimiento	124
Evaluación de textura (Texture Profile Analysis (TPA))	124
Variación de peso	124
Actividad de agua (a_w)	124
Análisis sensorial	125
Análisis estadístico	125
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	127
Caracterización de las harinas	127
Distribución del tamaño de partícula (DTP)	127
Determinación de color	129
Capacidad de retención de agua (CRA)	132
Análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA)	136
Análisis en masas	141
Capacidad fermentativa	141
Análisis en pan	146
Pérdida de peso durante el horneado	146
Análisis de envejecimiento	148
Evaluación de textura (Texture Profile Analysis (TPA))	149
Variación de peso	158
Actividad de agua (a_w)	159
Análisis sensorial	160
CONCLUSIONES	163
BIBLIOGRAFÍA	165
CONCLUSIONES GENERALES	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
INTRODUCCIÓN		
1	Diagrama esquemático de los cereales.	4
2	Diagrama del proceso de panificación.	17
3	Precios medios de los cereales en España campaña 2014/2015.	20
CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN DE LAS HARINAS DE LOS CEREALES A ESTUDIO: TRIGO, AVENA, MAÍZ Y SORGO.		
I.1	Figura típica del RVA.	39
I.2	Capacidad de retención de agua (CRA) de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.	47
I.3	Temperatura de empaste de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.	49
I.4	Viscosidad pico de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.	50
I.5	Viscosidad final de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.	52
I.6	Análisis de componentes principales (PCA) para la totalidad de las variables analizadas [Humedad (% Hd), Proteínas (% P), Lípidos (% G), Cenizas (% C), Carbohidratos (% CH), tamaño de partícula (D[4,3]µm), color (L*, a*, b* C* y H*), capacidad de retención de agua (CRA), viscosidad de las harinas [(temperatura de empaste (Te), viscosidad pico (Vp), viscosidad final (Vf), viscosidad mínima (Vm), viscosidad ruptura (V rup), viscosidad restitución (Vr)].	56
CAPÍTULO II. ESTUDIO DE LA PANIFICACIÓN UTILIZANDO HARINA DE TRIGO SUSTITUIDA PARCIALMENTE POR HARINA DE AVENA, MAÍZ O SORGO.		
II.1	Capacidad de retención de agua (CRA) de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).	84

II.2	Desarrollo de viscosidad generada por la sustitución de HT con HA en los diferentes niveles (2.5, 5, 7.5 o 10%).	86
II.3	Desarrollo de viscosidad generada por la sustitución de HT con HM en los diferentes niveles (2.5, 5, 7.5 o 10%).	86
II.4	Desarrollo de viscosidad generada por la sustitución de HT con HS en los diferentes niveles (2.5, 5, 7.5 o 10%).	87
II.5	Temperatura de empaste de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).	88
II.6	Viscosidad pico de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).	89
II.7	Viscosidad final de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).	91
II.8	Volumen de la masa (cm ³) de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS) a una hora de fermentación.	96
II.9	Pérdida de peso durante el horneado de la masa obtenida de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).	98
II.10	Actividad de agua de panes obtenidos de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).	103

CAPÍTULO III. MODIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS HARINAS DE AVENA, MAÍZ Y SORGO PARA INCIDIR SOBRE SU CAPACIDAD PANIFICADORA.

III.1	Gráfico de superficie para los valores de capacidad de retención de agua de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HA (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HA 10% (mezcla harina de trigo y harina de avena al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).	133
III.2	Gráfico de superficie para los valores de capacidad de retención de agua de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HM (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HM 10% (mezcla harina de trigo y harina de maíz al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).	134

III.3	Gráfico de superficie para los valores de capacidad de retención de agua de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HS (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HS 10% (mezcla harina de trigo y harina de sorgo al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).	135
III.4	Temperatura de empaste de las mezclas de HT sustituidas al 10 o 20% con harina de avena (HA), harina de maíz (HM) o harina de sorgo (HS) tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos. — Harina de trigo (HT); — HT: HA 10% sin tratamiento térmico; — HT: HM 10% sin tratamiento térmico; — HT: HS 10% sin tratamiento térmico.	137
III.5	Viscosidad pico de las mezclas de HT sustituidas al 10 o 20% con harina de avena (HA), harina de maíz (HM) o harina de sorgo (HS) tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos. — Harina de trigo (HT); — HT: HA 10% sin tratamiento térmico; — HT: HM 10% sin tratamiento térmico; — HT: HS 10% sin tratamiento térmico.	138
III.6	Viscosidad final de las mezclas de HT sustituidas al 10 o 20% con harina de avena (HA), harina de maíz (HM) o harina de sorgo (HS) tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos. — Harina de trigo (HT); — HT: HA 10% sin tratamiento térmico; — HT: HM 10% sin tratamiento térmico; — HT: HS 10% sin tratamiento térmico.	139
III.7	Gráfico de superficie para los valores de volumen de la masa (cm ³) de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HA (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HA 10% (mezcla harina de trigo y harina de avena al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).	143
III.8	Gráfico de superficie para los valores de volumen de la masa (cm ³) de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HM (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HM 10% (mezcla harina de trigo y harina de maíz al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).	144
III.9	Gráfico de superficie para los valores de volumen de la masa (cm ³) de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HS (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HS 10% (mezcla harina de trigo y harina de sorgo al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).	146

- III.10 Pérdida de peso durante el horneado de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. — HT: HA 10%; — HT: HM 10%; — HT: HS 10%; — HT, todas ellas sin tratamiento térmico. 148
- III.11 Resultados de dureza (N) de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. — HT: HA 10%; — HT: HM 10%; — HT: HS 10%; — HT, todas ellas sin tratamiento térmico. 151
- III.12 Resultados de gomosidad de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. — HT: HA 10%; — HT: HM 10%; — HT: HS 10%; — HT, todas ellas sin tratamiento térmico. 153
- III.13 Resultados de masticabilidad de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. — HT: HA 10%; — HT: HM 10%; — HT: HS 10%; — HT, todas ellas sin tratamiento térmico. 155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
	INTRODUCCIÓN	
1	Valor nutritivo de los principales cereales contenidos en 100 g de grano crudo.	6
2	Precios a futuro de la Bolsa de Granos de Chicago de los cereales implicados en esta investigación (trigo, avena, maíz y sorgo).	19
	CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN DE LAS HARINAS DE LOS CEREALES A ESTUDIO: TRIGO, AVENA, MAÍZ Y SORGO.	
I.1	Composición química de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.	43
I.2	Distribución del tamaño de partícula (DTP) de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.	44
I.3	Análisis de color de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.	45
I.4	Resultado de viscosidad mínima, viscosidad de ruptura y viscosidad de restitución de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.	54
	CAPÍTULO II. ESTUDIO DE LA PANIFICACIÓN UTILIZANDO HARINA DE TRIGO SUSTITUIDA PARCIALMENTE POR HARINA DE AVENA, MAÍZ O SORGO.	
II.1	Distribución del tamaño de partícula (DTP) de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.	80
II.2	Resultados de color de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.	82
II.3	Resultados de viscosidad mínima, viscosidad de ruptura y viscosidad de restitución de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.	92
II.4	Propiedades físicas de las masas obtenidas de HT y las mezclas de HT sustituidas con HA, HM o HS.	95
II.5	Dureza, elasticidad y cohesividad de los panes obtenidos de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.	100

II.6	Gomosidad, masticabilidad y resiliencia de los panes obtenidos de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.	101
II.7	Resultados de color de la miga del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.	105
II.8	Resultados de la cata del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.	107

CAPÍTULO III. MODIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS HARINAS DE AVENA, MAÍZ Y SORGO PARA INCIDIR SOBRE SU CAPACIDAD PANIFICADORA.

III.1	Distribución del tamaño de partícula (DTP) de HT sustituida con HA, HM o HS al 10 o 20% (tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos), así como de HT y de HT: HA, HT: HM y HT: HS al 10% sin tratamiento térmico.	128
III.2	Determinación de color de HT sustituida con HA, HM o HS al 10 o 20% (tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos), así como de HT y de HT: HA, HT: HM y HT: HS al 10% sin tratamiento térmico.	132
III.3	Resultados de viscosidad mínima, viscosidad de ruptura y viscosidad de restitución de HT y HT sustituida con HA, HM o HS al 10 o 20% (tratadas a 80, 100 o 130°C/30 min). Mezclas de HT: HA 10%, HT: HM 10% y HT: HS 10%, sin tratamiento térmico.	140
III.4	Resultados de elasticidad, cohesividad y resiliencia de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. HT: HA 10%; HT: HM 10%; HT: HS 10%; HT, todas ellas sin tratamiento térmico.	157
III.5	Variación de peso del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA al 10 o 20% (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min), HM al 10% o HS al 10 o 20% (tratadas a 130°C/30 min) durante el estudio de envejecimiento.	159
III.6	Actividad de agua de la miga del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA, HM o HS al 10 o 20% (tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos), así como de HT y de HT: HA, HT: HM y HT: HS al 10% sin tratamiento térmico.	160

III.7 Resultados de la cata del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA al 10 o 20% (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min), HM al 10% o HS al 10 o 20% (tratadas a 130°C/30 min).

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Los cereales

Los cereales son las semillas de las gramíneas y forman una parte muy importante dentro de la dieta de la mayoría de la población. Dentro de estos granos tenemos el trigo, maíz, arroz, cebada, avena, centeno, sorgo y mijo (Kent, 1994). Los cereales constituyen la principal fuente de energía por su alto aporte energético a un bajo costo en comparación con otros alimentos. Se cultivan y transportan con bastante facilidad, pudiendo ser almacenados por largos periodos de tiempo. Son mucho más accesibles que otros alimentos y su preparación para su consumo es fácil de realizar. El consumo de cereales data desde los tiempos antiguos. En civilizaciones americanas, el cereal predominante era el maíz, que actualmente continua siendo uno de los alimentos básicos de la dieta de las poblaciones, mientras que en Asia se da el origen del actual trigo cultivado. Desde oriente medio el cultivo del trigo se difundió en muchas direcciones principalmente a Europa y a Rusia. Actualmente, el consumo de cereales es de los más altos con respecto a otros alimentos. Su consumo puede ser de forma natural o procesada a partir de la transformación de los granos en harinas. También destacan por ser utilizados de manera importante en alimentación animal.

Estructura de los cereales

Los cereales a pesar de tener una composición química diferente presentan características estructurales muy similares entre ellos. Las partes fundamentales del grano son (Figura 1):

- El salvado o cáscara (pericarpio y cutícula), el cual ésta constituido por una serie de capas que cubren y protegen el endospermo y el germen. Esta parte es alta en celulosa que forma parte de la fibra y no puede ser digerida por el organismo humano. Contiene algunas vitaminas del complejo B, proteínas y hierro.
- El germen o embrión, se localiza cerca del extremo inferior del grano y es el encargado de generar la nueva planta. Contiene proteína,

hierro, niacina, tiamina, riboflavina y un alto contenido de grasa, que frecuentemente puede ocasionar reacciones de rancidez en el grano, por lo que durante la molienda de los granos, para elaborar harinas, es separado normalmente.

- El endospermo o núcleo, es la parte de reserva del grano que permite el desarrollo de una nueva planta. De él se obtiene la harina y ésta formado por grandes cantidades de almidón y una proporción menor de proteínas. Constituye la porción mayor del grano del cereal.

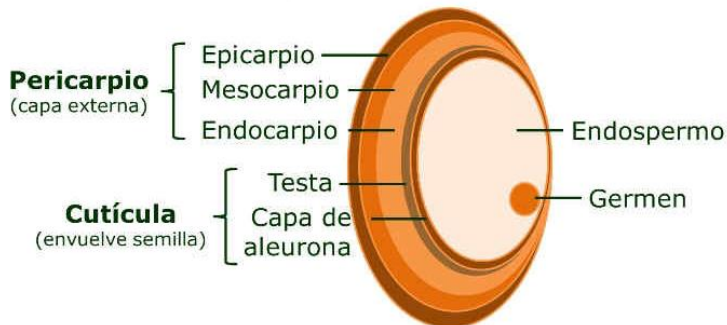


Figura 1. Diagrama esquemático de los cereales.

Fuente: www.botanical-online.com

Valor nutritivo

La forma y tamaño de los cereales es normalmente diferente, sin embargo, estos granos tienen un valor nutritivo similar. Muchas de las diferencias en el valor nutricional están supeditadas al procesamiento al que se someten los granos. Los cereales aportan alrededor de 300 a 350 kilocalorías por cada 100 g, por lo que se consideran como una fuente importante de energía dentro de la dieta.

Los cereales son básicamente alimentos energéticos donde destaca de forma importante en su composición los hidratos de carbono, alto contenido de fibra (integrales o enteros) y proporciones moderadas de proteínas y lípidos. El componente mayoritario lo encontramos en forma de almidón y en menor medida en celulosa, hemicelulosa, pentosanas, dextrinas y azúcares simples. El almidón es la principal fuente de nutrientes de los cereales. Se digiere y se

absorbe con lentitud, generando así una liberación constante de glucosa en la sangre. También por su alto contenido en hidratos de carbono no complejos pueden ser considerados alimentos esenciales en la alimentación humana. Altos contenidos de fibra alimentaria son contenidos por los cereales, siempre y cuando no se hayan sometido a molienda para eliminación del salvado. Esta fibra es de gran beneficio dentro de la dieta, en donde la fibra soluble es capaz de estabilizar ciertos niveles de glucosa. Además, la fibra contribuye a la reducción de peso, ya que alimentos ricos en fibras están indicados en dietas de adelgazamiento por el bajo aporte calórico que tienen y por la sensación de saciedad como efecto del incremento de volumen del contenido intestinal.

En lo que respecta a las proteínas de los cereales, estas se encuentran distribuidas por todas las capas estructurales del grano, encontrándose en mayor concentración en el endospermo y pericarpio. El contenido proteico puede ser muy variable en estos granos y puede ir de 6 a 16% dependiendo del tipo de cereal y del procesamiento industrial al que se haya sometido. Es importante destacar el contenido proteico de los cereales, sin embargo, no aportan una proteína completa por su déficit en algunos aminoácidos esenciales, principalmente lisina y triptófano. Es por ello que la combinación con leguminosas o proteínas de origen animal es necesaria para mejorar considerablemente el valor biológico de las proteínas y lograr una dieta más equilibrada.

Los lípidos de los cereales son glicéridos de ácidos grasos. El ácido graso predominante es el linoleico seguido del oleico y el palmítico. La porción lipídica se encuentra en mayor proporción en el germen en cantidades variables que en algunos granos de cereales permite la extracción de aceite. Las vitaminas E y B₁ se encuentran en el salvado y la pierden durante la molienda. En maíz y trigo se encuentran también la tiamina, riboflavina, niacina, piridoxina y el ácido pantoténico, mientras que en arroz se encuentra principalmente la tiamina, riboflavina y niacina. En la cebada y avena encontramos la niacina y el ácido pantoténico. En cuanto a minerales podemos encontrar hierro, potasio, calcio y sodio en granos de trigo y arroz, mientras que en maíz fósforo, hierro y magnesio diferenciándose en el grano

de cebada por que no contiene hierro y en lugar de este es potasio al igual que avena.

Tabla 1. Valor nutritivo de los principales cereales contenidos en 100 g de grano crudo.

<i>Cereal</i>	<i>Kilocalorías</i>	<i>Agua</i>	<i>Proteínas</i>	<i>Grasa</i>	<i>Carbohidratos</i>
Trigo	340	12	16	2.9	74.1
Arroz	357	13	9.1	2.2	71.2
Maíz	356	12	11.1	3.8	80.2
Cebada	332	12	11.8	1.8	78.1
Avena	380	9	11.6	7.1	69.8
Centeno	340	12	13.4	1.8	80.1
Sorgo	355	12	12.4	3.6	79.7

Fuente Kent, N.L. (1994) Tecnología de los cereales. Introducción para estudiantes de ciencia de los alimentos y agricultura.

Importancia en la alimentación humana

Los cereales, como se ha mencionado anteriormente han constituido desde su descubrimiento uno de los alimentos más importantes dentro de la alimentación humana. Los niveles de producción, su fácil almacenamiento y distribución han contribuido en gran medida al desarrollo de la civilización moderna. Actualmente, la mayor producción de cereales salvo algunos en menor grado como el arroz, son destinados al proceso de molturación para la obtención de harinas y sus derivados. También son empleados en la alimentación animal. Son muchos los productos que pueden ser elaborados a partir de los cereales. Dentro de los más importantes ésta el trigo por la capacidad que tiene su harina para producir pan. De todos los cereales el trigo y el centeno son los que poseen esta propiedad panificable de sus harinas, aunque el centeno en menor grado. En el caso del trigo, las proteínas que contiene y su proporción permiten la formación de una red continua visco elástica que retiene el gas carbónico durante la fermentación que permite la extensión de la masa para producir un pan de buenas

características organolépticas. Además de la elaboración de pan, es utilizado para producir galletas, pasteles, cereales para desayuno y pastas.

Otro cereal muy importante es el maíz que es básico en la alimentación de ciertas regiones en centro y Norteamérica. Su consumo es esencialmente en forma de mazorcas cocidas o guisadas o para hacer ciertos alimentos típicos de la región. El maíz sometido a proceso de nixtamalización es realizado para la preparación de tortillas, atoles o sopas. El maíz es muy importante también para la fabricación de harinas industriales, almidones, féculas, alcohol y aceite, además de materia prima para elaborar cereales en hojuela y frituras de maíz. También un porcentaje importante de su producción es destinado para alimentación animal (INCAP, 2000).

En relación al arroz, cereal de consumo muy importante en Asia, es utilizado normalmente para la preparación de platillos variados en combinación con otros alimentos. Se consume también en forma de atoles, bebidas y para elaborar alimentos infantiles, entre otros. En lo que respecta a avena, uno de los cereales con más alto valor energético y un patrón de aminoácidos que la hace de los cereales más completos nutricionalmente, es utilizado principalmente para elaborar hojuelas, harinas, atoles, cereales para desayuno, galletas y bebidas (INCAP, 2000). Otros cereales son la cebada y centeno. La cebada con características nutricionales importantes es utilizada principalmente en la elaboración de harinas para producir pan integral, además de bebidas refrescantes y en la alimentación animal. El centeno con cierta similitud al trigo y con capacidad de formación de gluten en pequeñas cantidades se combina con harina de trigo para elaborar pan. También es utilizado en alimentación animal (INCAP, 2000).

Finalmente sorgo y mijo, cereales con capacidades de resistencia importante a sequías y de consumo mayormente en África y Sur de Asia. Su consumo puede agruparse en dos categorías: los productos tradicionales y los industriales no tradicionales. Los granos procesados o no, se pueden cocer enteros o descortezados o incluso moler para obtener harinas. Estos cereales son utilizados para elaborar diferentes tipos de pan, productos cocidos o

hervidos, bebidas y alimentos de refrigerio, además de ser utilizados en la alimentación animal (INCAP, 2000).

Industrialización de los cereales

La necesidad de transformar los cereales para su adecuado consumo es muy frecuente. El grano entero es sometido a varios procesos con el objetivo de hacerlos más fáciles de preparar o de obtener productos que requieren un procesamiento ya que el ser humano no puede llevar a cabo la digestión adecuada de los granos crudos o de las harinas obtenidas de los mismos. Los granos de los cereales están formados básicamente de germen, endospermo, capas exteriores y cáscara de naturaleza fibrosa que tras el procesamiento da lugar a diferentes productos destinados al consumo humano o animal. Dentro de estas transformaciones tenemos las siguientes:

Industrialización del trigo

El trigo es utilizado principalmente para la producción de harinas y sémolas a partir de las cuales se obtienen una gran variedad de productos alimenticios como pan, galletas, pasteles y pastas, entre otros. La molienda del trigo tiene como fin separar el endospermo del salvado y del germen, reduciéndolo a harina. Este es un proceso gradual y sistemático de ruptura de los granos hasta llegar a un grado de extracción determinado. La recuperación del endospermo adherido al salvado y la reducción de este a harina generan diferentes fracciones del producto que son tamizadas con el propósito de separarlas según su tamaño y densidad (Hoseney 1994; Webb y Owen, 2003). El proceso de molienda se divide en cuatro pasos fundamentales que son:

- Recepción y almacenamiento del grano
- Limpieza y acondicionamiento del grano
- Molienda del trigo: producción de harina y subproductos
- Empaque y almacenamiento

Recepción y almacenamiento del grano. Consiste en recibir el grano de trigo que llega a granel al molino, realizarle algunas pruebas como porcentaje de humedad, de impurezas y grano dañado para determinar las condiciones de recepción del mismo grano. Así como establecer su lugar de almacenamiento, que normalmente es en silos.

Limpieza y acondicionamiento. Se realiza antes de empezar la molienda, ya que es necesario retirar todas las impurezas del grano. Se puede realizar por aplicación de aire a presión o a través de tamices que con movimientos rotatorios o de vaivén separan las impurezas. El acondicionamiento se basa en ajustar la humedad del grano para facilitar la separación de la cáscara y el salvado del endospermo. La adición de agua dependerá del tipo de grano que será sometido a molienda. Dentro de esta etapa también se lleva a cabo un reposo después de la adición de agua cuyo objetivo es facilitar la separación del salvado del endospermo, facilitar la desintegración del endospermo, lograr un mejor cernido y más eficiente, además de ahorro de energía por el grano más blando (Hernández, 2012).

Molienda del trigo. En esta etapa se produce la reducción del tamaño del grano de trigo a través de molinos de rodillos donde se separa inicialmente el salvado y el germen del endospermo, el cual se reduce hasta la obtención de harina. El objetivo de la molienda es maximizar el grado de extracción. Un porcentaje normal de extracción puede ser de 75%, sin embargo, encontramos extracciones que pueden variar de 65 a 98%. Este proceso de obtención de la harina se lleva a cabo en varias etapas, entre ellas: trituración, cribado, purificación, reducción y blanqueo de la harina. La trituración se realiza después de haber limpiado y acondicionado el grano, y es el paso del grano por rodillos que van reduciendo su tamaño, generándose trozos grandes, sémola impura y partes de harina. El cribado que es la utilización de cernidores formados por una serie de tamices que separan el producto proveniente de los molinos de trituración. La purificación que es la eliminación del salvado y clasificación de las sémolas por grosor a través de tamices y purificadores, con el objetivo de prepararlas para la molienda de reducción. La reducción es la molienda de las sémolas y semolinas purificadas para convertirlas en harina. Los cilindros de compresión reducen las

partículas de sémola hasta obtener un tamaño de partícula característico al de la harina (Hernández, 2012).

Empaque y almacenamiento. El producto madurado y enriquecido se empaqueta de diferentes formas dependiendo de la cantidad de harina. En lo que se refiere al almacenamiento, la harina puede ser almacenada a granel en silos o en bodegas iluminadas, frescas y ventiladas en donde se almacenan después de ser empacadas.

Industrialización de la cebada

La cebada es una planta que tiene gran importancia para el consumo humano y animal. En algunos países del norte de Europa y de América del Sur aún se utiliza como alimento para consumo humano. Sin embargo, es mucho más utilizada en el malteado para la elaboración de la cerveza y para destilar en la fabricación de whisky escocés y de ginebra holandesa (Ibarguren, 2014).

La cebada tiene importantes aplicaciones industriales como lo es la fabricación de cerveza, en destilería para obtener alcohol, en la preparación de maltas especiales, como sustitutivo del café, elaboración de azúcares, preparados de productos alimenticios y elaboración de harinas para panificación, entre otras. El malteo de la cebada es la materia prima fundamental para la elaboración de la cerveza. Éste consiste en la degradación enzimática del endospermo mediante la germinación, produciendo α y β amilasas. Una vez que el grano se hidrata hasta el nivel en donde comienza la respiración activa del mismo, se activan las enzimas, y estas degradan el almidón a maltosa. Siendo esta última, la materia prima base para la elaboración de cerveza (Ibarguren, 2014). Este proceso de malteo lleva varias etapas entre ellas están: una buena selección de la cebada, su posterior limpieza para eliminar material extraño, seguido por el remojo del grano, germinación y secado. Los objetivos de la operación son propiciar el mayor porcentaje de germinación posible, optimizar la actividad diastásica y concluir el proceso con la menor pérdida de materia seca (Serna, 1996).

Industrialización del maíz

El proceso de molienda del maíz implica varias operaciones como la maceración, desgerminación, molturación seca y húmeda, separación de salvado, almidón y proteína. La molienda seca se basa en la reducción del tamaño de las partículas para facilitar la separación de las fracciones constituyentes. Tiene por objeto la obtención de maíz molido integral o la separación de las diferentes partes anatómicas del grano. El proceso general de producción de sémola implica la separación del germen, salvado y endospermo harinoso, con una mínima reducción de endospermo vítreo. De los sub productos el más utilizado en alimentación animal es la harina forrajera formada por el salvado y el endospermo o almidón harinoso. En algunos casos puede incluir el germen. El grano de maíz contiene un porcentaje alto de germen con respecto al resto de los cereales con un alto contenido en grasa, lo que implica una mayor susceptibilidad a la rancidez. En la molienda seca se extrae el aceite del germen también, por medio de solventes o presión mecánica (Sala y Barroeta, 2003). El proceso de molienda seca en maíz se basa en las siguientes etapas:

Recepción. El maíz es recibido en silos, previo a un sistema de pre limpieza para separar por medio de zarandas y de un imán material extraño y metales. De los silos va directamente a producción pasando por el sistema de limpieza.

Limpieza. Consiste en una serie de máquinas que por diferencia de tamaño y peso separa piedras, polvo, granos quebrados, partículas metálicas y al final de este proceso, el maíz pasa por una rosca humedecedora que agrega agua para acondicionar el maíz para la desgerminación.

Proceso de desgerminación. Consiste en separar el germen del maíz sin exceder el 16.0% de humedad. Se realiza quebrando el grano en dos trituradores de impacto y mediante mesas clasificadoras, se divide en tres fracciones por diferencia de peso específico de los subproductos; ya que el endospermo (la parte más dura del maíz) tiene mayor peso específico que el germen.

Molienda. Los sub productos libres de germen van a los molinos de cilindros para ser triturados, luego son clasificados en cernidores planos de acuerdo al tamaño; después pasan a otros molinos de cilindros que lo trituran hasta obtener la granulometría deseada de los productos finales.

Secado. Los productos finales pasan por un sistema de secado neumático que reduce la humedad de 15.0% a 12.0%, para una mejor estabilidad del producto. Después de pasar por enfriamiento hasta llegar a temperatura ambiente, son depositados en los silos de productos terminados. La harina granular y la harina extrafina, después del enfriamiento son fortificadas con un compuesto concentrado de vitaminas A, E, B1, B2, B6, Hierro, Niacina, Ácido Fólico y Acido Pantoténico.

Empacado. Los productos terminados son empacados en los diferentes formatos de venta.

En lo que respecta a la molienda húmeda del maíz que es la separación mecánica de las diversas partes del grano tras la adición de agua, con o sin anhídrido sulfuroso para extraer el almidón. Este proceso tiene como objetivo la separación del salvado y germen del endospermo, y de fraccionar el endospermo en sus componentes químicos, almidón y proteína. El grano de maíz es humedecido cuarenta y ocho horas mediante inmersión en agua ligeramente acidificada (maceración) para evitar fermentaciones y su germinación. Después se somete a trituración y luego a molienda separando el germen del resto del grano. El germen es lavado, secado, molido y calentado a 70°C para extraer el aceite por presión o disolventes, obteniéndose como sub producto el bagazo de maíz. Lo que resta de la molienda después de retirar el germen, se muele más finamente y bajo el efecto de una corriente de agua se somete a un tamizado en el que queda retenido el salvado que después será lavado y secado. El líquido resultante tiene en suspensión el almidón y el gluten que serán separados por centrifugación. El gluten que se mantiene en suspensión será decantado y luego secado (gluten meal). Los líquidos resultantes de la maceración del grano (corn steep) son concentrados siendo generalmente mezclados con el salvado y comercializados como gluten feed. Este último constituido por

salvado, agua de maceración concentrada, restos de gluten y por la adición de residuos del cribado del maíz en proporción no superior al 15% en peso, e incluso de residuos procedentes de las aguas de maceración del maíz utilizadas para la producción de alcohol u otros derivados del almidón. También el producto puede contener residuos de la extracción del aceite del germen de maíz igualmente por vía húmeda (Sala y Barroeta, 2003).

Industrialización del sorgo

El sorgo, cereal de gran importancia en África e India por el alto consumo y la gran variedad de alimentos tradicionales que son elaborados a base de este cereal en estas regiones. Este proceso de molienda inicia con la limpieza del grano por medio de mesas cribatorias, aspiración, magnetos y mesas densimétricas, para continuar con una clasificación por medio de tamices y remoción del pericarpio y germen (discos abrasivos) antes de ser procesado en algún tipo de alimento. De este proceso se obtiene un grano perlado o decorticado con menor cantidad de aceite, fibra y cenizas. La cantidad de material removido por abrasión o durante el proceso de decorticación varía entre 15 y 30%. Para llevar a cabo este proceso de perlado se utilizan sistemas tradicionales de molienda o decorticadores mecánicos, que generalmente poseen discos abrasivos que por fricción remueven el pericarpio y germen del grano. Después de terminar con este proceso, se procede a remover el material que se desprendió del grano con la utilización de cribas y sistemas de aspiración. Al término del proceso anterior el grano perlado puede ser sometido a molienda en molinos de rodillos, piedras o de martillos para la producción de harinas (Serna, 1996).

Industrialización de avena

La avena es uno de los cereales más ricos en nutrientes. Es un alimento muy apreciado, tanto por su sabor como por su alto contenido en vitaminas, minerales y aminoácidos. En un comienzo, la producción de avena se destinaba únicamente para alimentación animal, sin embargo, poco a poco se ha industrializado para la elaboración de productos de consumo humano. Las siguientes son las etapas relacionadas con la molienda de la avena:

Limpieza y clasificación. En esta etapa se eliminan las impurezas gruesas, la arena y las partículas ligeras, además se clasifica la avena según el tamaño de los granos.

Descascarillado, aspiración y separación. En esta fase la descascarilladora extrae la cáscara, no digerible, del grano de avena. Gracias a las aletas de impacto del rotor, estriadas, la avena choca horizontalmente contra el anillo de impacto, separándose la cáscara del grano. Esta solución ofrece varias ventajas, además de una alta capacidad y un alto grado de descascarillado con una mínima rotura, la descascarilladora destaca por su bajo consumo de energía y su alto rendimiento.

Separación. Por medio de una mesa densimétrica con una combinación de placas selectoras se consigue una separación óptima de la avena y de los granos de avena descascarillados. Los granos no descascarillados son devueltos de nuevo a la descascarilladora.

Secado. El tratamiento hidrotérmico de la avena en el secador prolonga la durabilidad, reduce la cifra total de gérmenes y asegura un sabor excepcional.

Corte, aspiración y clasificación. El cortador corta los granos hasta obtener avena pelada y cortada. El clasificador extrae los granos no cortados.

Tratamiento por vapor y laminación. Un tratamiento homogéneo con vapor prepara los granos de avena entera o previamente cortada óptimamente para la fase de laminación. En el molino laminador, la gelatinización del almidón favorece los valores nutricionales específicos de la avena y cuida al

mismo tiempo de que el producto final tenga un aspecto atractivo. La utilización de un vaporizador con molino laminador y secador de lecho fluidizado garantiza la calidad de los copos.

El pan

A lo largo de la historia del hombre, el pan ha sido y muy probablemente lo seguirá siendo, la base de su alimentación. Los egipcios son considerados los precursores de la panificación, ya que descubrieron que la masa fermentada producía un pan más liviano y de mayor volumen. Se han encontrado descubrimientos que los han relacionado con la invención de los primeros hornos (Varela et al., 1991). El artículo 2 de la reglamentación técnico sanitaria para la fabricación, circulación y comercio del pan y panes especiales, designa al pan como el producto perecedero resultante de la cocción de una masa obtenida por la mezcla de harina de trigo, sal comestible y agua potable fermentada por especies de microorganismos propias de la fermentación panaria, como el *Saccharomyces cerevisiae* (CEOPAN, 1988). El Código Alimentario Español diferencia dos tipos de pan.

1. Pan común: se define como el de consumo habitual en el día, elaborado con harina de trigo, sal, levadura y agua, al que se le pueden añadir ciertos coadyuvantes tecnológicos y aditivos autorizados. Dentro de este tipo se incluyen:

Pan bregado, de miga dura, español o candeal: es el elaborado con cilindros refinadores.

Pan de flama o de miga blanda: es el obtenido con una mayor proporción de agua que el pan bregado y normalmente no necesita del uso de cilindros refinadores en su elaboración.

2. Pan especial: es aquel que por su composición e incorporar algún aditivo o coadyuvante especial, por el tipo de harina, por otros ingredientes especiales (leche, huevo, grasa, cacao, etc.), por no llevar sal, por no haber sido fermentado, o por cualquier otra circunstancia autorizada, no

corresponde a la definición básica de pan común. Como ejemplos de pan especial tenemos:

Pan integral: es aquel en cuya elaboración se utiliza harina integral, es decir, la obtenida por trituration del grano completo, sin separar parte alguna del mismo grano.

Pan de Viena o pan francés: es el pan de flama que entre sus ingredientes incluye azúcares, leche o ambos a la vez.

Pan de molde o americano: es el pan de corteza blanda en cuya cocción se emplean moldes.

Pan de cereales: es el elaborado con harina de trigo más otra harina en proporción no inferior al 51%. Reciben el nombre de este último cereal (pan de centeno, pan de maíz, etc.)

Pan de huevo, pan de leche, pan de miel y pan de pasas, etc., son panes especiales a los que se añade alguna de estas materias primas, recibiendo su nombre de la materia prima añadida (Mesas y Alegre, 2002).

Proceso de panificación

Este proceso es presentado en el siguiente diagrama de flujo (Figura 2).

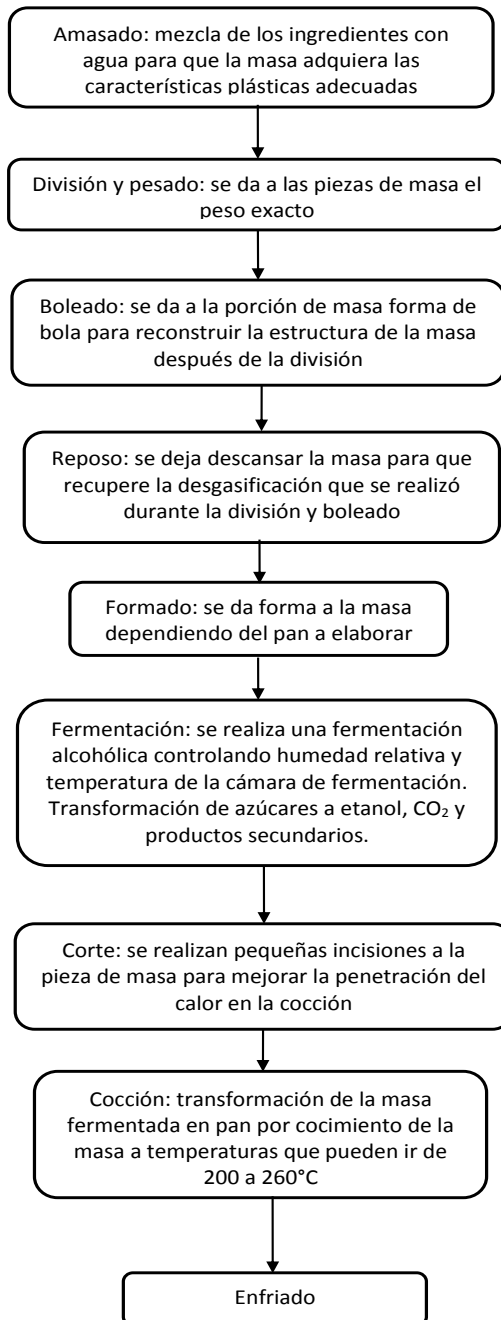


Figura 2. Diagrama del proceso de panificación.

Mercado de cereales implicados en estudio

Los altos consumos de alimentos producidos a base de harina de trigo generan muy frecuentemente inestabilidad en los costos del grano que son regidos por mercados internacionales, aunando a esto el déficit en producción que tienen los países. Es por ello que surge la necesidad de utilizar harinas compuestas, en las que se mezclan granos de trigo con otros cereales que normalmente son de bajo costo con respecto a oleaginosas o leguminosas. Es por ello que en el estudio se plantea la utilización de harinas de avena, maíz o sorgo, dado que el seguimiento en el costo de estos cereales ha reflejado su menor precio con respecto al del trigo, siendo además los niveles de consumo en la alimentación mundial más bajos en el caso de la avena y hasta con cierta tendencia a disminuir como es el caso del sorgo. La Tabla 2 nos muestra los precios a futuro de la Bolsa de Granos de Chicago de los cereales implicados en esta investigación (trigo, avena, maíz o sorgo).

Sin embargo, cuando los precios a nivel mundial se trasladan a países como España, el cual según la Asociación de fabricantes y productores de harinas y sémolas de España (AFHSE) es un país estructuralmente deficitario en la producción de trigo blando, teniendo unas necesidades de importación del 50 por ciento del total demandado (en términos absolutos de unos 5 o 6 millones de toneladas importadas cada año), los precios se incrementan. Pero no solo los precios son mayores, sino que el valor del grano de trigo sufre variaciones importantes durante el año. Así, como se observa en la Figura 3, mientras el trigo duro tuvo un precio promedio durante 2014-2015 de 328.7 €/tonelada, los de trigo blando, cebada y maíz fueron de 190.76, 171.64 y 170.12 €/tonelada respectivamente en la misma anualidad. Pero como se observa en la gráfica mientras estos últimos tuvieron ligera variación en el precio durante el año, en el caso del trigo duro la variación fue muy pronunciada llegando a ser casi del 60% (MAGRAMA, 2016).

Tabla 2. Precios a futuro de la Bolsa de Granos de Chicago de los cereales implicados en esta investigación (trigo, avena, maíz y sorgo).

<i>Cereal</i>	<i>Tipo de producto</i>	<i>Lugar de entrega</i>	<i>Precio anterior (Dls/Ton)</i>	<i>Precio actual (Dls/Ton)</i>
Trigo	Rojo duro de invierno de MN	Minneapolis, MN	190.7	189.6
	Durum de invierno de USA	Portland, TX	304.97	303.14
	Primavera del Norte Oscuro de Minneapolis, USA	Duluth, MN	292.48	285.31
	Primavera del Norte Oscuro de Duluth, USA	Duluth, MN	329.22	309.2
	Durum de exportación de Thunderbay, Canadá	Thunderbay, Canadá	384.12	384.05
Avena	---	---	162.07	165.17
Maíz	Amarillo No. 2	Kansas City	146.15	148.81
	Blanco No. 2	Kansas City	156.69	153.14
	Amarillo No. 2 de exportación	Golfo, US	162.59	164.95
	Amarillo	Golfo de Lousiana	163.77	162.59
	Amarillo Yellow	Amarillo, TX	154.32	150.39
	Golfo de exportación	Minneapolis, MN	129.13	127.95
Sorgo	Del Golfo calidad Milo	Golfo, US	168.43	167.11
	De Memphis	Memphis, Tennessee	143.74	142.64
	Planicies altas de Texas	Texas	122.36	124.78
	Planicies altas de Texas	Sur de Texas	123.9	126.77
	Planicies altas de Texas	Norte de Texas	123.68	126.77
	Planicies del sur de Texas	Sur de Texas	141.76	144.4

Fuente: ASERCA, 2015. Agencia de servicios a la comercialización y desarrollo de mercados agropecuarios. SAGARPA. México.

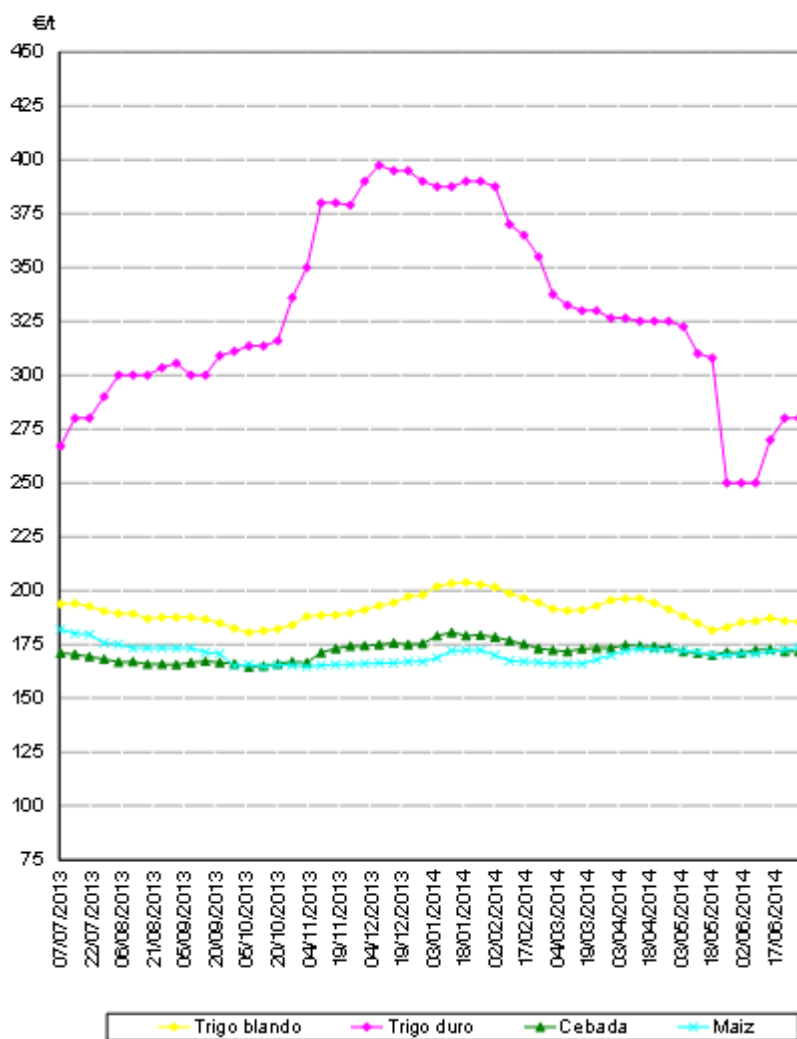


Figura 3. Precios medios de los cereales en España campaña 2014/2015. Magrama 2016.

BIBLIOGRAFÍA

ASERCA, 2015. Agencia de servicios a la comercialización y desarrollo de mercados agropecuarios. SAGARPA. México.

CEOPAN 1988. Manual de formación profesional en panadería. Madrid. Ed. Panorama Panadero.

Hernández, E. 2012. Tecnología de cereales. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia.

Hoseney, R.C. 1994. Principles of Cereal Science and Technology, 2nd Edn., American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, MN, USA.

Ibarguren, L. 2014. Cátedra de Agricultura Especial. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Argentina.

INCAP 2000. Cereales y sus productos. Contenidos actualizados de nutrición y alimentación. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá- INCAP/OPS.

Kent, N.L., Evers A.D. 1994. Technology of cereals: an introduction for students of food science and agriculture. 4th Ed. Pergamon.

MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). 2016. Evolución de los precios de los principales cereales campaña 2014-2015. <http://www.magrama.gob.es>. Consulta 30/01/2016

Mesas, J.M., Alegre, M.T. 2002. El pan y su proceso de elaboración. CyTA Journal of Food. Vol. 3, No. 5, 307-313.

Sala, R., Barroeta, A.C. 2003. Manual de microscopía de piensos. Departamento de Ciencia Animal y de los Alimentos. Universidad Autónoma de Barcelona.

Serna-Saldívar, S.O. 1996. Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. AGT, Editores. S.A.

Varela, G., Carbajal, Á., Monteagudo, E., Moreiras, O. 1991. El pan en la alimentación de los españoles. EUDEMA S.A. Ediciones de la Universidad Complutense S.A.

Webb, C., Owens, G.W. 2003. Milling and flour quality. In Bread making Improving quality. Stanley P. Cauvain (Eds) CRC Press LLC, EUA.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general que se plantea es el estudio del control y mejora de la panificación de masas bajas en harina de trigo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para el desarrollo del objetivo general se plantean 3 objetivos específicos los cuales se enmarcan en los tres capítulos que conforman la tesis:

Capítulo I. Caracterización de las harinas de los cereales a estudio: Harina de trigo, avena, maíz y sorgo

El objetivo planteado para el presente capítulo es la caracterización físico-química de harinas cien por cien de trigo, avena, maíz y sorgo, con la finalidad de conocer sus características a fin de evaluar su incidencia en la capacidad de panificación.

Capítulo II. Estudio de la panificación utilizando harina de trigo sustituida parcialmente por harina de avena, maíz o sorgo

El objetivo del presente capítulo es el estudio del uso de mezclas binarias de harinas de trigo sustituidas parcialmente con harinas de avena, maíz o sorgo. El estudio se centrará en evaluar diferentes grados de sustitución de harina de trigo y su efecto sobre las masas y panes elaborados con ellas.

Capítulo III. Modificación de las características de las harinas de avena, maíz y sorgo para incidir sobre su capacidad panificadora

El objetivo planteado para este capítulo es modificar las características de las harinas sustitutorias, mediante un tratamiento térmico, con la finalidad de incidir sobre su capacidad panificadora de manera que estas puedan ser mejoradas.

CAPÍTULO I

***CARACTERIZACIÓN DE LAS HARINAS DE LOS
CEREALES A ESTUDIO: TRIGO, AVENA, MAÍZ Y
SORGO***

INTRODUCCIÓN

Los principales cereales utilizados en la alimentación mundial son el trigo, el arroz y el maíz, que son transformados en forma de harina para la elaboración de productos tales como el pan, la pasta, las galletas etc., además del consumo como granos o sémolas. Sin embargo, otros cereales como la avena, que tiene un mejor balance de amino ácidos esenciales que cereales de mayor consumo como el trigo y el maíz, no es muy utilizada para el consumo humano (Mohamed et al., 2009). El consumo de otros cereales como sorgo o mijo, que también cuentan con una aportación nutricional importante con respecto a otros cereales, es bajo y con tendencia a disminuir. Finalmente la cebada que puede ser considerado cereal de consumo similar al de trigo, arroz y maíz se utiliza principalmente para la elaboración de cerveza y productos destilados (Kent, 1994).

La transformación de los cereales generalmente implica la molienda del grano para la obtención de harinas. La denominación harina se designa exclusivamente al producto obtenido de la molienda del endospermo del grano de trigo. Si se trata de otros cereales o leguminosas es necesario indicar el grano utilizado para su elaboración, por ejemplo harina de maíz, harina de sorgo, harina de avena etc. (Mesas y Alegre, 2002). Efectos sobre la composición química y nutricional de la harina son observados a través del proceso de molienda, dependiendo esto de la secuencia de operaciones llevadas a cabo y del grado de separación logrado. Dentro del grano de trigo, los componentes principales no se encuentran distribuidos uniformemente lo que genera variaciones en la composición y funcionalidad de las distintas fracciones de la harina en función de que fracción del grano esté presente en esta (Dewettinck et al., 2008). El tamaño de partícula, niveles de cenizas, porcentaje de proteínas, actividad enzimática y el contenido de almidón dañado de las diferentes fracciones son afectados principalmente por el flujo de molienda (Ruffet, 1994; Prabhasankar et al., 2000). El Boletín Oficial del Estado (Gobierno de España) para definir el concepto de harina establece el Real Decreto 1286/1984, 23 de mayo, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para la elaboración, circulación y comercio de las harinas y sémolas de trigo y otros productos de su molienda, para

consumo humano. Por decreto, la definición de harina deberá entenderse sin otro calificativo, como el producto finamente triturado obtenido de la molturación del grano del trigo, *Triticum aestivum* o la mezcla de éste con el *Triticum durum*, en la proporción máxima 4:1 (80 por 100 y 20 por 100), maduro, sano y seco e industrialmente limpio. Los productos finalmente triturados de otros cereales deberán llevar adicionado, al nombre genérico de la harina el del grano del cual proceden.

Por Real Decreto 1615/2010, de 7 de diciembre, por el que se aprueba la norma de calidad del trigo: 1) Se establece la norma de calidad del trigo, tanto para los trigos blandos como para los trigos duros, en función de los parámetros de calidad tenidos en cuenta para los diferentes usos y utilizaciones de los granos, sus harinas y sus sémolas. La norma de calidad del trigo tiene por objeto la comercialización normalizada de la oferta española de trigo. 2) La presente norma será de aplicación en las operaciones comerciales en territorio español de las que el trigo blando o el trigo duro sean objeto, excluidas las que tengan como destino la siembra.

Para cumplir con la norma de calidad las harinas son sujetas a una serie de parámetros como son: Fuerza panadera, tenacidad, extensibilidad, índice general de calidad, contenido de proteína, calidad del gluten, índice de amarillo y peso específico.

Sin embargo, otras determinaciones son frecuentemente realizadas para determinar la calidad de las harinas. Entre ellas están las siguientes: Análisis físico-químicos (proteína, humedad, ceniza, tamaño de partícula, color y almidón dañado, entre otros); métodos que se basan en la capacidad de hidratación de las harinas que pueden ser predictivos de la calidad de esta como son la capacidad de retención de solventes (agua, sucrosa, carbonato de sodio y ácido láctico) (Ram et al., 2005) que se basan en la capacidad de las harinas para retener determinado peso de solvente después de haber sido centrifugadas y se expresan como % del peso de harina (al 14%) (Slade y Levine, 1994). Además de los métodos anteriores, también se utilizan ensayos reológicos y de viscosidad. Entre los reológicos más comunes tenemos: farinograma y alveograma que se basan en la capacidad que tienen

las harinas a la absorción de agua para formar una masa visco elástica (Ponzio, 2010). En lo que respecta a los análisis de viscosidad podemos encontrar análisis amilográfico y perfil de viscosidad, entre otros, que se basan en el registro de viscosidad de una muestra suspendida en un solvente bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y agitación.

De los cereales mencionados anteriormente solo el trigo tiene la capacidad de ser utilizado para la elaboración de pan y es debido a las propiedades de sus proteínas (gliadinas y gluteninas), las cuales tienen la capacidad de formar una red visco elástica (gluten), cuando la harina es mezclada con agua. Esta propiedad que poseen las proteínas del trigo es la que las hace panificables y proporciona las características plásticas de la masa de pan (Calvel, 1983; Eliasson y Larsson, 1993; Calaveras, 1996). Del total de proteínas del trigo, el 80 y 85% son las que forman el gluten que se encuentran normalmente en el endospermo. El resto de proteínas (15 a 20%) son las que no están involucradas en la formación del gluten y se encuentran principalmente en las capas externas del trigo y en poca cantidad en el endospermo (Goesaert et al., 2005). Además del trigo, la propiedad de formación de gluten es encontrada en pequeña medida en el centeno (Kent, 1994). Esta cualidad de panificación hace que el trigo sea uno de los cereales con más demanda a nivel mundial. La elaboración de pan es el que absorbe mayormente esta producción.

El pan es un producto perecedero resultante de la cocción de una masa obtenida por la mezcla de harina de trigo, sal comestible y agua potable fermentada por la levadura. Datos elaborados por la Secretaria General de Fomento Industrial e Innovación del MAGRAMA, a partir de los datos de la Encuesta Industrial Anual de Empresas del INE (Años 2011 y 2012) señalan que el gasto en materias primas en el sector de la panadería y bollería durante el año 2012 fue de 2.632 millones de euros, un 39,7% del gasto total de la industria alimentaria, y que la inversión en activos de materiales es de 297 millones de euros. En concreto, el sector de panadería es altamente demandante de cereales. Según la asociación de fabricantes y productores de harinas y sémolas de España (AFHSE), España es un país estructuralmente

deficitario en la producción de trigo blando, teniendo unas necesidades de importación del 50 por ciento del total demandado (en términos absolutos de unos 5 o 6 millones de toneladas importadas cada año). Así, tal y como señalan los estudios sobre la Cadena de Valor del Pan llevado a cabo por el Observatorio de Precios de MAGRAMA, España es claramente un país importador de trigo blando, lo cual hace que los precios del trigo en España fluctúen en función de los mercados internacionales, siendo la volatilidad de los mercados de trigo muy elevada. Un descenso en la presión que supone para el sector la dependencia del trigo es el uso de otras harinas que puedan sustituir total o parcialmente la harina procedente de trigo. En este sentido la utilización de harinas de avena, sorgo, maíz, etc. podrían ser una gran alternativa.

Así, el objetivo planteado para el presente capítulo es la caracterización físico-química de harinas cien por cien de trigo, avena, maíz y sorgo, con la finalidad de conocer sus características a fin de evaluar su incidencia en la capacidad de panificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

I.2.1 Materias primas

La harina de trigo (HT) utilizada para este estudio fue obtenida de un productor local (Molí de Picó Harinas Segura S.L. Valencia, España). La harina de avena (HA) y harina de maíz (HM) fueron adquiridas de una tienda local (La Carabasseta, Valencia, España), mientras que la harina de sorgo (HS) se compró en una panadería comercial (Integral Food S.A. Barcelona, España).

I.2.2 Caracterización de las harinas

I.2.2.1 Composición química

Los porcentajes de humedad, proteína, grasa cruda y ceniza fueron determinadas por los métodos siguientes: 44-40, 46-13, 30-20 y 08-01 (AACC, 1995), respectivamente, siendo los carbohidratos calculados por diferencia del sumatorio de los anteriores con el 100%.

I.2.2.2 Distribución del tamaño de partícula (DTP)

Se analizó la distribución de tamaño de partícula de las harinas $d(0.1) \mu\text{m}$, $d(0.5) \mu\text{m}$ y $d(0.9) \mu\text{m}$, representando el diámetro máximo de 10%, 50% y 90% de las partículas, además de la media del volumen ponderado $D[4,3] \mu\text{m}$. Para ello se utilizó un Láser Scattering (Mastersizer 2000, Malvern, Instruments, UK), equipado con una unidad Scirocco (Dry Powder Unit) (Villarino et al., 2015). El equipo tiene un rango de medida de 0.02-2000 μm . Los parámetros de medida fueron fijados de acuerdo a la norma ISO 13320-1. Se aplicó la teoría Mie considerando un índice de refracción de 1.52 y de absorción de 0.1.

1.2.2.3 Determinación de color

Se realizó con el Colorímetro Konica Minolta (Modelo Chroma Meter CR-400, Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japón). Los parámetros evaluados pertenecientes al espacio cromático CIE L*a*b* fueron los siguientes: L* (Luminosidad), a* (variación de rojo a verde) y b* (variación de amarillo a azul) (Gilabert, 2002). También se obtuvieron las coordenadas psicométricas tono (H*) y croma (C*). Para la obtención de estos parámetros se realizaron 5 disparos dirigidos a diferentes puntos sobre las muestras de harinas colocadas en una caja Petri.

1.2.2.4 Capacidad de retención de agua (CRA)

La capacidad de retención de agua se realizó en base al método 56-11 (AACC, 2000). Se colocaron 5 g de harina \pm 0.05 g en un tubo de 50 mL (Nalgene Centrifuge Ware) a la cual se le añadió 25 g de agua \pm 0.05 g. La mezcla fue agitada vigorosamente por 5 s para hacer suspender la harina. Las muestras se mantuvieron 20 min en agitación intermitente a los 5, 10, 15 y 20 min seguida de centrifugación por 15 min a 1000 x g (Centrifuge Beckman Coulter Allegra X-30R, Brea, California, USA) a temperatura ambiente. El sobrenadante fue descartado y el pellet húmedo fue decantado por 10 min para finalmente ser pesado. Los cálculos se realizaron de acuerdo a Haynes et al., (2009). La medición se realizó por triplicado.

1.2.2.5 Análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA)

El perfil de viscosidad de las harinas fue obtenido de acuerdo al método 76-21 (AACC, 2000). Las muestras de HT, HA, HM y HS fueron analizadas en base a 3.5 g \pm 0.01 g de muestra ajustadas al 14% de humedad. La cantidad de agua a incorporar fue de 25 g \pm 0.01 g resultado del propio ajuste al que se llevó a las harinas (Shittu et al., 2007). Para esta determinación se utilizó el viscosímetro RVA (Rapid Visco Analyser Super 4, Newport Scientific Australia). Mediante el software Thermocline del RVA se seleccionó el perfil

de la prueba (estándar 1) que fue de una temperatura inicial de 50°C y 960 rpm, disminuyendo la velocidad a 160 rpm a los 10 s. Al minuto, la temperatura se mantuvo en 50°C para aumentar hasta 95°C a los 4.42 min, manteniéndose así hasta los 7.42 min. A los 11 min la temperatura bajo a 50°C hasta terminar la prueba a los 13 min. Esta medición se hizo por triplicado. En la Figura I.1 se muestra una gráfica típica de esta medición.

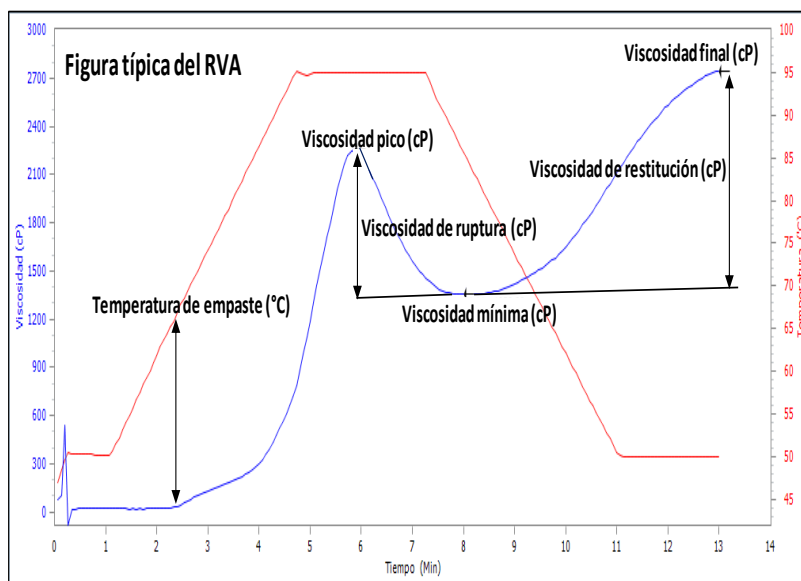


Figura I.1. Figura típica del RVA.

A partir de la información generada por el ensayo RVA se pueden obtener los siguientes parámetros que describen la harina:

- Temperatura de empaste (pasting temperature, °C) que indica la temperatura a la cual la viscosidad comienza a incrementar por arriba de la línea base durante la fase inicial de calentamiento.
- Viscosidad pico (peak viscosity, cP) que indica la viscosidad máxima durante la fase de calentamiento de la muestra.
- Viscosidad mínima (trough viscosity, cP) que indica la viscosidad mínima después de la viscosidad pico.

- Viscosidad de ruptura (breakdown viscosity, cP) que indica la diferencia entre la viscosidad pico y la viscosidad mínima.
- Viscosidad final (final viscosity, cP) que indica la viscosidad final de la prueba.
- Viscosidad de restitución (setback viscosity, cP) que indica la diferencia entre la viscosidad final y la viscosidad mínima.

1.2.3 Análisis estadístico

Los resultados se analizaron aplicando un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Para discriminar entre las medias se utilizó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. El Análisis estadístico se llevó a cabo con el programa Statgraphics Centurion XVI con un nivel de confianza del 95%. Además y con la finalidad de evaluar que parámetros de los analizados para cada harina describen mejor cada una de estas y por tanto las diferencia de las otras, se procedió a realizar un análisis conjunto de todos los parámetros y datos de composición mediante el procedimiento estadístico multivariado, análisis de componentes principales (PCA). Para ello se utilizó el paquete estadístico PLS Toolbox 6.3 (Vector propio Research Inc., Wenatchee, Washington, EE.UU.), una extensión de la caja de herramientas en el entorno computacional Matlab 7.6 (The Mathworks, Natick, Massachusetts, EE.UU.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I.3.1.1 Composición química

La composición química de los cereales suele ser bastante homogénea, siendo los carbohidratos generalmente el componente mayoritario y de ellos el almidón regularmente es el que se encuentra en más altos porcentajes dentro del endospermo (Gil Hernández, 2010). Los lípidos se encuentran en pequeñas cantidades normalmente en el germen y capa aleurona (cubierta exterior del endospermo). En relación a las proteínas, estas se encuentran en el endospermo, germen y cubiertas externas, siendo los cereales una fuente muy útil de estos nutrientes. Aparte de ser muy importantes desde el punto de vista nutricional, las proteínas también lo son por su carácter funcional dado que ciertas fracciones proteicas (gliadinas y gluteninas) pueden contribuir de manera importante en parámetros reológicos y de viscosidad, entre otros, que son determinantes para su uso en la industria alimentaria (Barak et al., 2013). Pero si bien la composición de los cereales es bastante homogénea, esta cambia cuando estos son sometidos a los tratamientos para hacerlos aptos para consumo humano. Normalmente estos son molturados para obtener harinas donde hay eliminación de germen y salvado afectando de manera importante su composición química.

El contenido de humedad, proteína, lípidos, ceniza y carbohidratos de las HT, HA, HM y HS son presentados en la Tabla I.1. Se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de los diferentes componentes de las harinas. La HT fue la que presentó los valores de humedad más altos (13.09 ± 0.01), mientras que la HA fue la menor (10.34 ± 0.05). Sin embargo, estas harinas mostraron valores inversos con respecto al contenido de lípidos (HT, 1 ± 0.02 y HA, 8 ± 0.19), siendo el valor obtenido para HA el mayor de las harinas analizadas y semejante a los reportados por Hu et al., (2014). El contenido en lípidos es muy importante ya que usualmente tienen efectos en la viscosidad de las harinas por la inhibición del hinchamiento de los gránulos de almidón por reducción de la velocidad de imbibición del agua. Es por ello que la HA, que mostró un valor más alto de lípidos al resto de los cereales, junto con su contenido en β -glucanos y proteínas podrían influir en las

diferencias de viscosidad con respecto al resto de las harinas (Zhou et al., 1999, 2000). Diferencias estadísticas fueron encontradas también en el % de proteína, siendo los valores más altos los encontrados en la HT (12.7 ± 0.28) con respecto al resto de los cereales. Así, la harina más afectada en este sentido fue HM (8.3 ± 0.24). Contrario a este comportamiento fue el observado en el % de ceniza, la HT (0.32 ± 0.03) presentó el % más bajo junto con la HM (0.38 ± 0.03), mientras que la HS (1.74 ± 0.17) el valor más alto, seguramente guardando una relación importante con el grado de refinación de las harinas. Es importante tener en cuenta el contenido en proteínas dado que estas pueden estar relacionadas con el aumento o disminución de la viscosidad de las harinas y por tanto una influencia importante en la absorción de agua (Batey, 2000).

En relación al contenido de carbohidratos se pudo observar que la HT (72.89%) mantuvo un valor medio muy semejante al de HS (73.97%), siendo el valor más bajo el observado en HA (69.74%). La interacción entre el almidón y las proteínas del gluten son determinadas por la naturaleza individual de las proteínas. Cuando el gluten de diferentes harinas es añadido al mismo almidón, el efecto varía de acuerdo a la proteína. El gluten que contiene sub unidades 5 + 10 de gluteninas de alto peso molecular tiene un mayor efecto que las que contienen sub unidades 2 + 12 (Batey, 2000).

El contenido de cenizas es otro de los parámetros importantes en las harinas. El % de materia mineral en la harina ésta dado por la relación directa con el grado de extracción de la misma y puede ser un parámetro importante relacionado con la calidad de la molienda y rendimiento en harina de trigo (Barrera et al., 2012). En este sentido, los valores menores fueron obtenidos para la HT (0.32 ± 0.03) y HM (0.38 ± 0.03), siendo el valor mayor el obtenido para la HS (1.74 ± 0.17).

Tabla I.1. Composición química de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.

<i>Harina</i>	<i>Humedad (%)</i>	<i>Proteína (%)</i>	<i>Lípidos (%)</i>	<i>Ceniza (%)</i>	<i>*Carbohidratos (%)</i>
<i>Trigo</i>	13.09 ± 0.01 a	12.7 ± 0.28 a	1 ± 0.02 a	0.32 ± 0.03 a	72.89
<i>Avena</i>	10.34 ± 0.05 d	11 ± 0.25 b	8 ± 0.19 d	0.92 ± 0.02 b	69.74
<i>Maíz</i>	11.89 ± 0.19 c	8.3 ± 0.24 d	2.8 ± 0.08 c	0.38 ± 0.03 a	76.63
<i>Sorgo</i>	12.59 ± 0.12 b	10 ± 0.24 c	1.7 ± 0.28 b	1.74 ± 0.17 c	73.97

* Calculado por diferencia. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

I.3.1.2 Distribución del tamaño de partícula (DTP)

Los resultados de distribución de tamaño de partícula son mostrados en la Tabla I.2. Se observa una diferencia significativa importante en el valor medio de la distribución del tamaño de partícula $D[4,3]$ μm (promedio de las mediciones de $d(0,1)$, $d(0,5)$ y $d(0,9)$) entre los cuatro cereales. La HT fue la que registró el valor más bajo (99.42 ± 0.88) de las harinas analizadas, mientras que HS (209.61 ± 1.30) fue la que mostró el valor mayor, más del doble del observado en HT. El tamaño de partícula es considerado un importante criterio en la selección de materia prima y un factor importante que afecta la calidad y sabor de productos alimenticios (Singh et al., 2013). En harina de trigo el tamaño de partícula tiene un efecto significativo en la funcionalidad de las harinas. Estudios realizados por Gómez, et al., (1987) observaron que partículas grandes interrumpen la formación de la masa y reducen la formación de ampollas, además de disminuir la absorción de aceite en alimentos freídos cuando es utilizado como recubrimiento de alimentos, mientras que las partículas pequeñas son responsables de la mayor parte de absorción de agua, viscosidad, plasticidad y suavidad de la masa.

Tabla I.2. Distribución del tamaño de partícula (DTP) de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.

<i>Harina</i>	<i>d(0.1) μm</i>	<i>d(0.5) μm</i>	<i>d(0.9) μm</i>	<i>D [4,3] μm</i>
<i>Trigo</i>	25.53 ± 1.15 a	92.41 ± 0.81 a	181.11 ± 0.80 a	99.42 ± 0.88 a
<i>Avena</i>	14.64 ± 0.50 d	146.00 ± 7.93 b	491.33 ± 10.67 d	205.48 ± 4.63 c
<i>Maíz</i>	17.46 ± 0.24 c	145.57 ± 1.55 b	312.35 ± 2.62 b	157.35 ± 1.63 b
<i>Sorgo</i>	26.64 ± 0.55 b	201.67 ± 1.33 c	393.01 ± 1.68 c	209.61 ± 1.30 d

μm, micrómetros. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

Estudios realizados por Hareland (1994) sobre la distribución del tamaño de partícula en harinas de diferentes trigos, con la utilización del análisis de difracción láser, mostraron que el 89-98% de las partículas fueron distribuidas dentro de los rangos de 10 a 41 μm y de 41 a 300 μm, mientras que del 2 a 11% de las partículas fueron distribuidas dentro del rango de < 10 μm. Concluyó también que la DTP fue afectada por la dureza del trigo, la clase, tipo de molino y tiempo de molienda, además, a diferencias en la matriz proteína-almidón formada dentro del endospermo de los granos. Los resultados obtenidos en nuestro estudio muestran un rango de 99 a 210 μm, el cual está dentro del segundo rango de las muestras analizadas por Hareland (1994). Se observó una disminución considerable en HT, seguramente asociado con el grado de refinación de las harinas. Esta reducción puede tener una serie de efectos en un sistema alimentario generando cambios en propiedades físico químicas debido al aumento de superficie de la partícula (Schubert, 1987; Wang y Flores, 2000; Toth et al., 2005). En el transcurso de la molienda, los gránulos de almidón pueden ser lesionados, produciendo así lo que se denomina almidón dañado. La intensidad del daño depende principalmente de la fuerza con que se realiza la molienda y de la dureza del grano (Hoseney, 1994). El almidón dañado afecta las propiedades de las harinas principalmente modifica la capacidad de hidratación (Hoseney, 1994).

I.3.1.3 Determinación de color

Los resultados de color de la HT, HA, HM y HS se presentan en la Tabla I.3. El valor de L^* mostró diferencias significativas entre las harinas, siendo la HT (95.94 ± 0.17) la que registro un valor mayor con respecto al resto de las harinas. En lo que respecta a la medición de a^* (variación de rojo a verde) también se observaron diferencias significativas entre las harinas. El valor más alto fue para la HS (6.55 ± 0.03) que fue la harina que mostró el valor menor de L^* , seguido de la HA (5.18 ± 0.02), HT (4.58 ± 0.03) y finalmente la HM (2.75 ± 0.08). Con respecto al valor de b^* (variación de amarillo a azul), la HT (2.76 ± 0.09) fue la que mostró el valor menor, mientras que la HM registró el valor mayor (18.23 ± 0.38) siendo la harina con valor menor de a^* , seguida de la HS (7.00 ± 0.18). En relación al valor de Cromo (C^* , describe lo llamativo o apagado de un color) los resultados mostraron diferencias significativas entre las harinas. El valor menor fue obtenido con la HT (5.37 ± 0.02) y el mayor con la HM (18.45 ± 0.37) coincidiendo con el comportamiento de estas mismas harinas cuando se analizó el valor de b^* . Finalmente, al analizar los resultados de H^* (valor Hue, que indica el tono) el valor menor de la medición fue en HT (31.46 ± 0.32), el valor más alto en HM (81.29 ± 0.28) seguido de la HS (46.84 ± 0.66) y HA (43.64 ± 1.13) coincidiendo con el comportamiento observado cuando se analizó el valor de b^* y C^* para las diferentes harinas.

Tabla I.3. Análisis de color de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.

<i>Harinas</i>	L^*	a^*	b^*	C^*	H^*
<i>Trigo</i>	95.94 ± 0.17 a	4.58 ± 0.03 a	2.76 ± 0.09 a	5.37 ± 0.02 a	31.46 ± 0.32 a
<i>Avena</i>	89.44 ± 0.37 c	5.18 ± 0.02 b	4.94 ± 0.21 b	7.16 ± 0.16 b	43.64 ± 1.13 b
<i>Maíz</i>	94.81 ± 0.24 b	2.75 ± 0.08 d	18.23 ± 0.38 d	18.45 ± 0.37 d	81.29 ± 0.28 d
<i>Sorgo</i>	83.89 ± 0.34 d	6.55 ± 0.03 c	7.00 ± 0.18 c	9.59 ± 0.14 c	46.84 ± 0.66 c

C^* , croma; H^* , valor Hue. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

Estudios realizados por Hidalgo et al., (2014) en harina de trigo, encontraron que el tamaño de partícula de harina de trigo tiene una relación importante con el valor de L^* , donde una disminución del valor de L^* se relacionó con

un mayor valor del tamaño de partícula. Este mismo comportamiento se observó en nuestro estudio al analizar el resto de los cereales (HA, HM o HS). De hecho, los procedimientos de molienda y las tasas de extracción tienen una influencia importante en varios componentes, como cenizas, proteínas, pigmentos y contenido de almidón dañado (Posner, 2009), que tienen influencia en la medición de color. Además, el tamaño de partícula de la harina está relacionada con las diferencias en especies de trigo y dureza del grano, aparte del contenido de humedad de los granos, que también es fuente de variación en el color de las harinas (Symons y Dexter, 1991).

1.3.1.4 Capacidad de retención de agua (CRA)

La capacidad de retención de agua se refiere a la capacidad que tienen los alimentos o sus componentes a retener agua bajo ciertas condiciones (Labuza and Busk, 1979). En harinas, esta propiedad es usada para determinar su calidad y habilidad para formar una masa visco elástica, la cual es esencial en la industria de los alimentos ya que determina las propiedades funcionales de las masas. La Figura 1.2 muestra la capacidad de retención de agua de la HT, HA, HM y HS. El análisis de los resultados nos muestra cómo la HT presentó el valor más bajo ($69.03 \pm 0.20\%$). Los valores mayores fueron obtenidos en la HM ($133.47 \pm 0.43\%$), seguido de HS ($127.94 \pm 0.11\%$) y HA (90.12 ± 0.36). En todas ellas se observaron diferencias significativas cuando fueron analizadas.

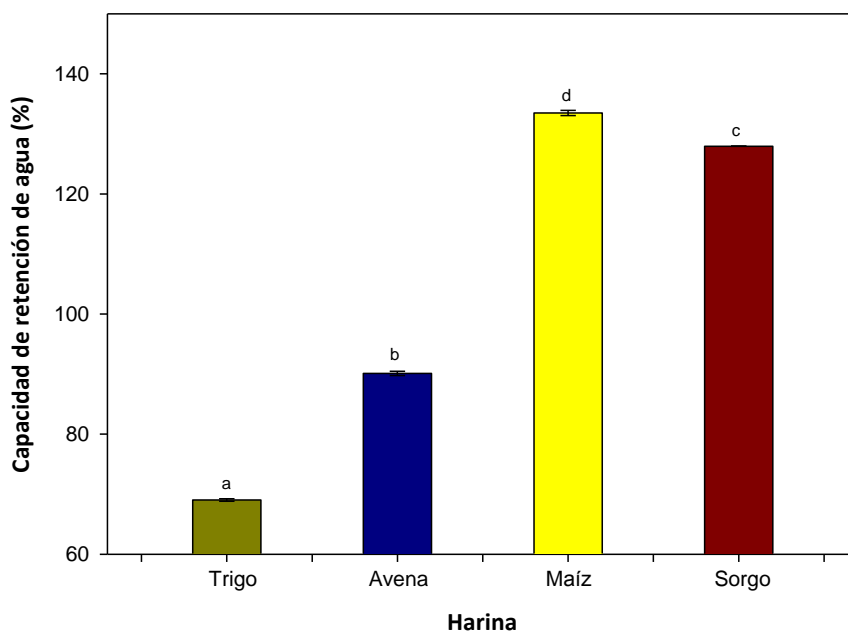


Figura I.2. Capacidad de retención de agua (CRA) de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.

Resultados obtenidos por Berton et al., (2002) determinaron la importancia del nivel de molienda de las harinas de trigo y la capacidad de retención de agua, donde un mayor nivel de molienda se traduce en un tamaño de partícula más pequeño y una mayor capacidad de retención de agua, si bien esta relación no fue observada para las harinas en estudio. Sin embargo, hay que considerar la composición química de las harinas ya que durante la molienda una parte de los gránulos de almidón se dañan parcialmente lo que permite la penetración del agua y el ataque enzimático, así la cantidad mayor de almidón dañado va a generar un aumento en la absorción de agua. El gránulo de almidón puede absorber entre 39 y 87% de agua en peso (Larsen, 1964; Rasper, 1980), mientras que el almidón dañado entre 200 y 430% (Bushuk, 1966; Bushuk, 1964), pentosanas entre 500 y 1500% (Jelaca, 1971) y proteínas entre 114 y 215% (Larsen, 1964; Bushuk, 1966). Así pues a cierto nivel de daño las propiedades mecánicas de la masa pueden verse afectadas de forma negativa.

I.3.1.5 Análisis de viscosidad de las harinas: Rapid Visco Analyser (RVA)

La Figura I.3 muestra la temperatura de empaste (°C) de la HT, HA, HM y HS. Los resultados mostraron una disminución importante en HT (68.95 ± 0.63) con respecto al resto de las harinas. Incrementos importantes se dieron en HA (88 ± 0.07) o HS (88.65 ± 0.21) con respecto a HT, sin mostrar diferencias significativas entre ellas. La HM (74.62 ± 0.60) registró un valor mayor también con respecto a HT, sin embargo, alejado también del registrado por HA o HS.

La temperatura de empaste nos da una idea de la temperatura mínima requerida para la transformación en pasta de la muestra. Puede tener implicaciones para la estabilidad de otros componentes en una formula y también en los costos de energía. Estos valores se ven afectados por las características propias de los cereales y la interacción con el agua, además de la temperatura y tiempo de la prueba. Una mayor temperatura de empaste como la observada en HA o HS puede ser reflejo de una mayor estabilidad interna del gránulo de almidón, normalmente asociada a una mayor presencia de zonas semicristalinas y a un mayor contenido de amilosa (Imberty et al., 1988). Por otra parte, harinas como HT o HM con más baja temperatura de empaste son generadas por una absorción rápida de agua por los gránulos de almidón debido al debilitamiento de las moléculas (amilosa-amilopectina), fenómeno asociado a una menor presencia de amilosa y a una mayor presencia de regiones cristalinas dentro del gránulo que requieren temperaturas más bajas de calentamiento (Alvis et al., 2008).

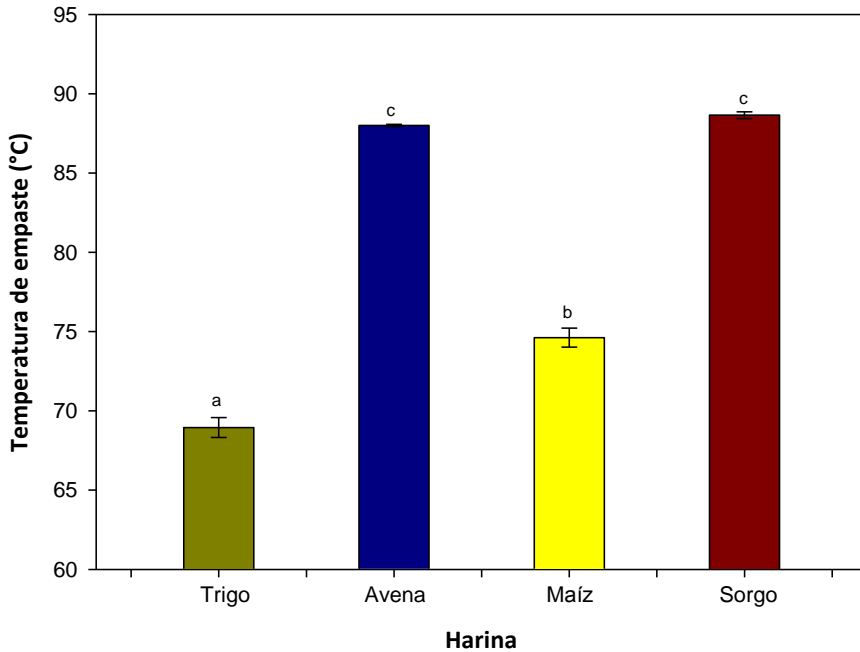


Figura I.3. Temperatura de empaste de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.

Otro de los parámetros obtenidos en esta prueba fue la viscosidad pico (cP). Los resultados se muestran en la Figura I.4. No se observaron diferencias significativas entre la HT (2245 ± 15.55) y la HS (2222.5 ± 12.02). Los valores más altos se obtuvieron cuando se analizó la HM (3030 ± 11.31) seguido de la HA (2887.5 ± 4.94). La viscosidad pico nos indica la capacidad de retención de agua del almidón o de la mezcla. Es frecuentemente correlacionada con la calidad del producto final y también nos proporciona una indicación de la viscosidad probable de una mezcla. La viscosidad pico puede alcanzarse antes de que se llegue a la temperatura máxima, o puede no ocurrir hasta después de alcanzar dicha temperatura. Aquellas muestras que llegan a la viscosidad máxima antes de la temperatura máxima son almidones que muestran un rápido hinchamiento de sus gránulos. La viscosidad pico se relaciona con una combinación de la cantidad de hinchamiento de los gránulos y la velocidad de rompimiento. Los gránulos que tienen un alto poder de hinchamiento también tienden a tener una alta viscosidad. Así, es

importante considerar la velocidad de calentamiento ya que esta también tiene un efecto importante sobre la viscosidad pico (Batey, 2000).

Estudios realizados por Ferreras (2009), con diferentes fracciones de la molienda del trigo y harina de trigo, obtuvo valores de viscosidad pico de 2298 cP, valor muy cercano al obtenido en nuestro estudio para HT (2245 cP). En lo que respecta a HA, estudios con harina de avena comercial (Hüttner et al., 2010) encontraron rangos que van desde 3900 a 4900 cP, bastantes altos en comparación a los obtenidos en la HA (2887.5 cP) utilizada en nuestro estudio. Otros estudios (Tadeu Paraginski et al., 2014) relacionados con las propiedades de viscosidad de harina de maíz almacenada a diferentes tiempos obtuvieron valores de viscosidad pico de 3100 cP, muy cercano al resultado obtenido en esta investigación. Estudios realizados por Lee et al., (2002) con harina de sorgo donde fueron analizadas sus propiedades de viscosidad, encontraron rangos de viscosidad pico de 2300 a 2500 cP, siendo el valor mínimo de este rango muy próximo al encontrado en la HS (2222.5 cP) analizada en nuestra investigación.

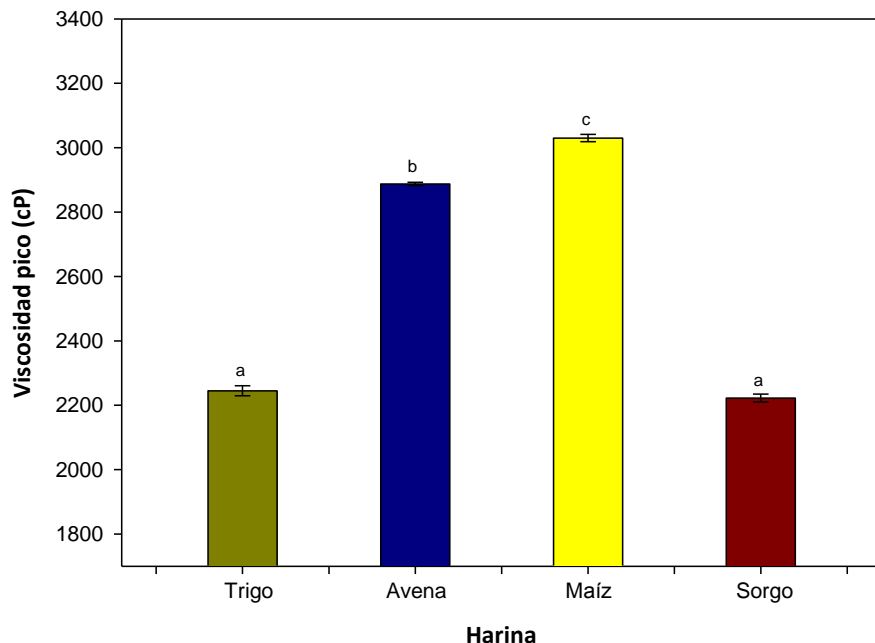


Figura I.4. Viscosidad pico de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.

Con el enfriamiento de la muestra a 50°C en este análisis de viscosidad se obtiene la viscosidad final (cP) (Figura I.5). Se observaron diferencias significativas entre todas las harinas analizadas. En HT (2660 ± 5.65) fue observada la viscosidad menor para este parámetro, seguida de HS (3461.5 ± 6.36) y HA (4024 ± 2.82). El incremento más importante se dio en HM (5187 ± 15.55) al igual que en la viscosidad pico. Este incremento fue de casi el doble al registrado por HT. La viscosidad final es el parámetro más comúnmente utilizado para definir la calidad de una muestra en particular, ya que indica la capacidad del material para formar una pasta o gel después de la cocción y el enfriamiento. En relación al valor obtenido para HT, estudios realizados por Ferraras (2009) encontraron valores de 2689 cP, muy similar al obtenido en nuestro estudio (2660 cP). Otro cereal que se destacó por el alto valor registrado con respecto al resto de las harinas fue HM, sin embargo, valores más altos (7099 cP) fueron encontrados para este mismo cereal por Tadeu-Paraginski et al., (2014). Hüttner et al., (2010) al trabajar con harinas de avena comercial encontró valores en un rango de 4400 a 4800 cP, valores ligeramente superiores al obtenido en nuestro estudio (4024 cP). En lo que respecta a HS, estudios realizados por Lee et al., (2002) observaron valores en un rango de 3400 a 3600 cP, rango en el que se encontró el valor obtenido en nuestras muestras (3461.5 cP).

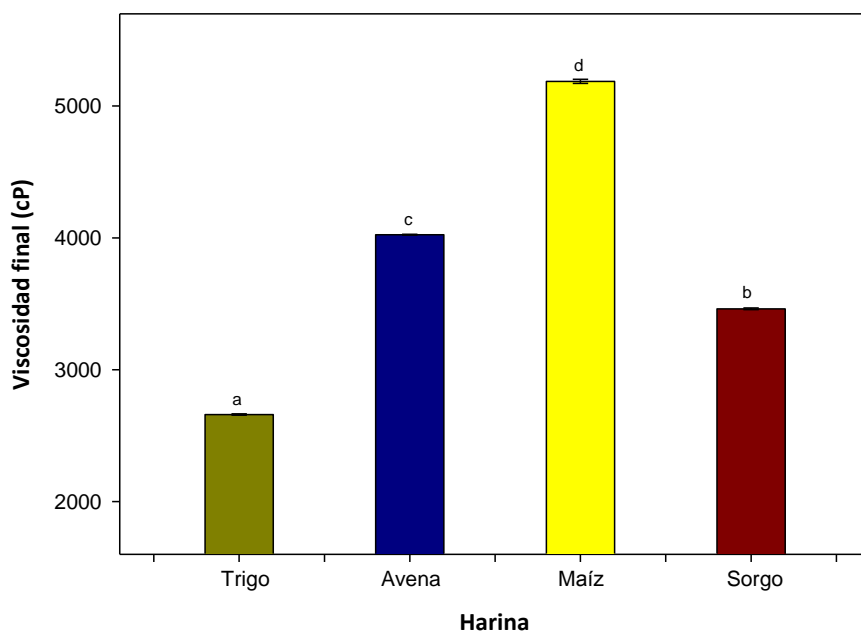


Figura I.5. Viscosidad final de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.

Otros de los parámetros obtenidos en el ensayo son la viscosidad de ruptura (breakdown viscosity) y viscosidad de restitución (setback viscosity), además de la viscosidad mínima (trough viscosity). La Tabla I.4 muestra los valores obtenidos para cada una de las harinas utilizadas en este estudio. Se observaron diferencias significativas entre las harinas cuando se analizó la viscosidad mínima. El valor observado más bajo fue para HT (1421 ± 4.94) seguido de HS (1894 ± 0) y HM (2188 ± 5.65), mientras que el resultado más alto fue para HA (2265 ± 8.48). Estudios realizados por BucSELLA et al., (2016) obtuvieron valores de viscosidad mínima de 867.5 cP en harinas de trigo sometidas a tratamiento térmico, bastante menor al obtenido en nuestro estudio. Sin embargo, Fierens et al., (2015) que trabajo con harinas de trigo bajo condiciones de almacenamiento obtuvieron valores de 1195 cP y 1244 cP, respectivamente, cercanos al obtenido en nuestra HT. En lo que respecta a HA, Hüttner et al., (2010), al desarrollar trabajos con viscosidad de harina de avena obtuvo resultados de viscosidad mínima bastante cercanos (2500 a 2700 cP) al resultados de nuestro estudio. La HM mostró valores cercanos a

HA para este parámetro, sin embargo, bastante menor al reportado por Tadeu-Paraginski et al., (2014) que fue de 2700 cP al trabajar con harina de maíz sometida a almacenamiento controlado. Al observar estudios relacionados con harina de sorgo, Lee et al., (2002) obtuvieron rangos de viscosidad mínima de 1600 a 1700 cP cercano al de 1894 cP de la HS analizada. Regularmente esta etapa del perfil de viscosidad referida sucede después de haberse alcanzado la viscosidad pico, que por efecto de agitación y temperatura esta empieza a disminuir debido al rompimiento del gránulo de almidón hasta llegar al punto denominado viscosidad mínima.

Para la viscosidad de ruptura se observaron diferencias significativas entre las harinas, excepto entre la HT (823.5 ± 10.6) y HM (842 ± 5.65). Valores muy bajos fueron observados cuando se determinó en HS (328.5 ± 12.02), siendo los valores para HA de (622.5 ± 3.53). Estudios realizados por BucSELLA et al., (2016) y Fierens et al., (2015) en harinas de trigo, Hüttner et al., (2010) en harinas de avena, Tadeu-Paraginski et al., (2014) en harinas de maíz, Lee et al., (2002) en harina de sorgo, obtuvieron valores más altos en este parámetro cuando fue comparado con los resultados obtenidos en nuestro estudio, para cada uno de los cereales mencionados anteriormente. Valores altos de viscosidad de ruptura también fueron observados por Ragaee et al., (2006) en los que este valor fue asociado a altos valores de viscosidad pico, lo que se relaciona con el grado de hinchamiento del gránulo de almidón durante la etapa de calentamiento. El poder de hinchamiento de algunos gránulos de almidón hace que alcancen fácilmente su viscosidad máxima.

Finalmente la viscosidad de restitución, al igual que en la viscosidad mínima, mostró diferencias significativas entre las harinas. El comportamiento observado en esta medición fue muy semejante al obtenido con la viscosidad final. La HT (1238.5 ± 10.6) presentó el valor más bajo, seguido de HS (1567.5 ± 6.36) y HA (1759 ± 5.65). La HM (2999 ± 9.89), al igual que en la medición de viscosidad pico, fue donde se observó un valor mucho más alto con respecto al resto de harinas.

Tabla I.4. Resultados de viscosidad mínima, viscosidad de ruptura y viscosidad de restitución de la harina de trigo, avena, maíz y sorgo.

<i>Harina</i>	<i>Viscosidad mínima (cP)</i>	<i>Viscosidad de ruptura (cP)</i>	<i>Viscosidad de restitución (cP)</i>
<i>Trigo</i>	1421 ± 4.94 a	823.5 ± 10.6 a	1238.5 ± 10.6 a
<i>Avena</i>	2265 ± 8.48 d	622.5 ± 3.53 b	1759 ± 5.65 b
<i>Maíz</i>	2188 ± 5.65 c	842 ± 5.65 a	2999 ± 9.89 d
<i>Sorgo</i>	1894 ± 0 b	328.5 ± 12.02 c	1567.5 ± 6.36 c

cP, Centipoise. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

Estudios realizados por Tadeu-Paraginski et al., (2014) también obtuvieron valores altos (4398 cP) en este parámetro cuando analizó harina de maíz. En lo que respecta a HT, resultados obtenidos por BucSELLA et al., (2016) observaron valores semejantes (1133 cP) a la HT sometida a estudio. El resto de los cereales analizados en este estudio como son HA o HS mostraron valores más bajos a los reportados por HÜTTNER et al., (2010) y Lee et al., (2002), 2074 cp y 1881 cP, respectivamente. Estudios realizados por Zaidul et al., (2003) reportaron que la viscosidad de restitución refleja la tendencia a la retrogradación del almidón, lo cual inhibe el aumento de la viscosidad mínima al enfriar. El poder de hinchamiento de los gránulos de almidón hace que fácilmente lleguen a su máxima viscosidad, lo que hace probable una rápida presencia de la viscosidad de ruptura por su débil fuerza intermolecular.

1.3.1.6. Análisis multivalente de componentes principales (PCA) del conjunto de todas las variables

Con la finalidad de evaluar que variables de las analizadas son las que mayormente caracterizan a cada una de las harinas y por tanto las separa de la harina de trigo, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) con la totalidad de las variables analizadas [Humedad (% Hd), proteínas (% P), lípidos (% G), cenizas (% C), carbohidratos (% CH), tamaño de partícula (D[4,3]µm), color (L*, a*, b* C* y H*), capacidad de retención de agua (CRA), viscosidad de las harinas (temperatura de empaste (Te), viscosidad pico (Vp),

viscosidad final (Vf), viscosidad mínima (Vm), viscosidad ruptura (V rup), viscosidad restitución (Vr)]. El análisis de resultados generó 3 componentes principales los cuales recogen en PC 1 el 47.86%, en PC 2 el 34.31% y en PC 3 el 17.83% del total de la variabilidad de los puntos, respectivamente, en relación con el tipo de harina. En la Figura I.6 se muestra la representación tridimensional de los scores de las tres primeras componentes, tanto para las muestras como para las variables. Las cargas de PC 1 mostraron las variables Vp, Vf, CRA, % G, Vm, a*, % C, Te y D[4,3] como contribuciones positivas, principalmente, Te y D[4,3]. Las variables con contribuciones negativas fueron: C*, b*, % CH, % P, Vr, L* y V rup, dentro de la zona 0 del eje se encuentra H*. En el caso de PC 2 las variables con contribución positiva fueron: % G, L*, V rup, D[4,3], Vm, Vp, CRA, Vf, H*, C*, b*, Vr y % CH, mientras que la contribución negativa fue dada por las variables % C, % Hd, a* y % P, en este análisis se ubicó Te en la zona 0 del eje. En lo que respecta al PC 3, las variables localizadas en la zona positiva fueron: a*, % C, % Hd, CRA, H*, C*, b* y % CH. En la zona negativa fueron ubicadas las variables % P, % G, Te, L*, V rup, Vm, Vp y Vf. Finalmente dentro de la zona 0 del eje se encontraron las variables D[4,3] y Vr.

En el caso de HT, la variable proteína fue la que más afectó a su disposición espacial, siendo la cantidad de grasa la que la hizo para la HA. En el caso de la HS tanto la concentración en cenizas como el tamaño de partícula y la temperatura de empaste fueron las que generaron una mayor influencia en su disposición. En el caso de la HM fueron las variables cantidad de hidratos de carbono, viscosidad final, viscosidad de restitución y las componentes de color b*, cromas y tono las que la situaron espacialmente respecto al resto de harinas. En todos los casos ha sido la mayor variable composicional de cada una de las harinas la que ha marcado la discriminación espontánea en el diagrama espacial.

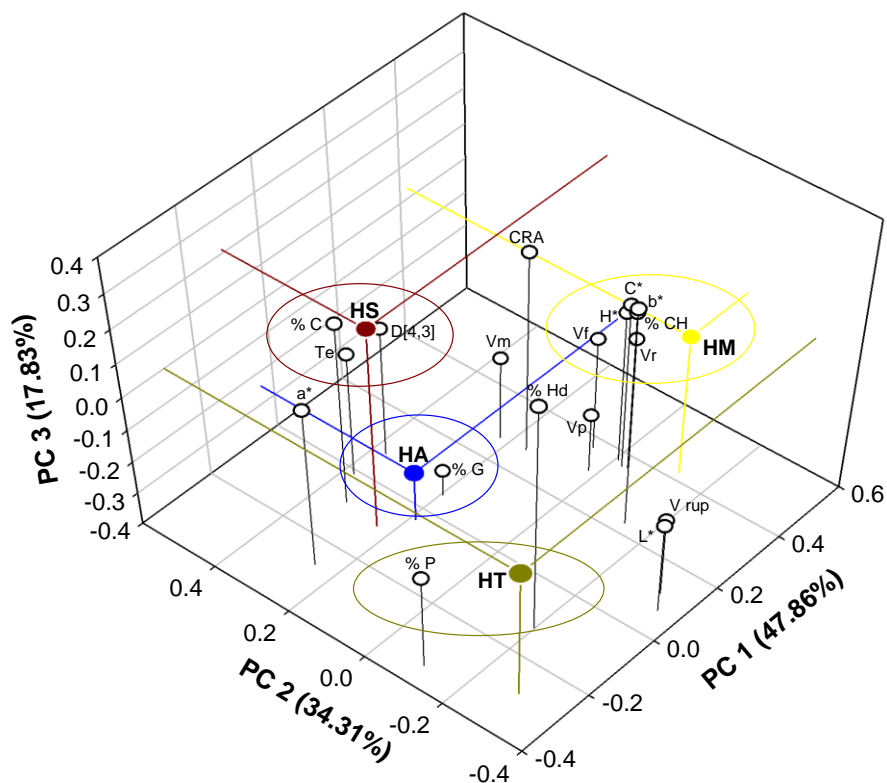


Figura I.6. Análisis de componentes principales (PCA) para la totalidad de las variables analizadas [Humedad (% Hd), Proteínas (% P), Lípidos (% G), Cenizas (% C), Carbohidratos (% CH), tamaño de partícula (D[4,3]µm), color (L*, a*, b* C* y H*), capacidad de retención de agua (CRA), viscosidad de las harinas [(temperatura de empaste (Te), viscosidad pico (Vp), viscosidad final (Vf), viscosidad mínima (Vm), viscosidad ruptura (V rup), viscosidad restitución (Vr)].

CONCLUSIONES

La caracterización de las harinas de trigo, avena, maíz y sorgo ha mostrado como tanto la composición, como el tamaño de partícula, influyen directamente sobre las características de estas, por lo que aquellos parámetros que han manifestado mayor incidencia, para cada una de ellas, tendrán que tenerse en cuenta en los sucesivos estudios.

Así en el caso de la harina de trigo, el factor más influyente fue la mayor carga proteica, si bien aunque en menor grado también lo fue para la avena, para la cual el factor más discriminatorio fue su mayor grado lipídico.

En el caso de la harina de maíz su alto contenido en carbohidratos es el factor más influyente el cual incrementa los valores de capacidad de retención de agua y por tanto la viscosidad de las masas que genera. Para la harina de sorgo, tanto la materia mineral (cenizas), como el mayor tamaño de partícula, fueron los parámetros más influyentes, haciendo que aunque su capacidad de retención de agua sea elevada, la viscosidad de las masas sea baja.

BIBLIOGRAFÍA

AACC, 1995. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists. 9th Ed. The Association, St. Paul, MN, USA.

AACC, 2000. Approved Methods of American Association of Cereal Chemists. 10th Ed. The Association, St. Paul, MN, USA. Methods 56-11, 76-21.

Alvis, A., Vélez, C.A., Villada, H.S., Rada-Mendoza, M. 2008. Análisis físico-químico y morfológico de almidones de ñame, yuca y papa y determinación de viscosidad de las pastas. Información Tecnológica Vol. 19 (1), 19-28.

Barak, S., Mudgil, D., Khatkar, B.S. 2013. Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties. LWT-Food Science and Technology (51) 211-217.

Barrera, G.N., Bassi, E., Reyes-Martínez, R.J. León, A.E., Ribota, P.D. 2012. Efectos de diferentes fracciones de harinas de trigo pan obtenidas con molino industrial sobre la calidad de galletitas dulces. Agriscientia, Vol. 29 No. 2, 69-79.

Batey, I.L. 2000. Interactions of starch with gluteins having different glutenin sub-units. In: Wheat Gluten. P.R. Shewry and A.S. Tatham, Eds. Royal Society. Pp. 499-502.

Berton, B., Scher, J., Villieras, F., Hardy, J. 2002. Measurement of hydration capacity of wheat flour: Influence of composition and physical characteristics. Powder Technology (128) 326-331.

Bucsella, B., Takács, Á., Vizer, V., Schwendener, U., Tömösközi, S. 2016. Comparison of the effects of different heat treatment processes on rheological properties of cake and bread wheat flours. Food Chemistry (190) 990-996.

Bushuk, W., I. Hilnka, I. 1964. Water as a constituent of flour, dough, and Bread. Baker's Dig. (38) 43-46.

Bushuk, W. 1966. Distribution of water in dough and bread. Baker's Dig. 40 (5) 38-40.

Calaveras, J. 1996. Tratado de panificación y bollería. Ed. AMV Madrid.

Calvel, R. 1983. La panadería moderna. Ed. América Lee Buenos Aires.

Dewettinck, K., Van Bockstaele, F., Kuhne, B., Van de Walle, D., Courtens, T.M., Gellynck, X. 2008. Nutritional values of bread influence of processing, food interaction and consumer perception. Journal of Cereal Science (48) 243-257.

Eliasson, A. CH., Larsson, K. 1993. Cereals in breadmaking. A Molecular Colloidal Approach. Ed. Marcel Dekker, New York.

Ferreras-Charro, R. 2009. Análisis reológico de las diferentes fracciones de harina obtenidas en la molienda del grano de trigo. Tesis Ingeniería Técnica Agrícola. Universidad de Salamanca.

Fierens, E., Helsmoortel, L., Joye, J.I., Courtin, C.M., Delcour, J.A. 2015. Changes in wheat (*Triticum aestivum* L.) flour pasting characteristics as a result of storage and their underlying mechanisms. Journal of Cereal Science (65) 81-87.

Gilabert, E.J. 2002. Medidas del color. Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

Gil Hernández A. 2010. Cereales y productos derivados. En: Tratado de nutrición. Tomo 2. Composición y calidad nutritiva de los alimentos. Editorial Panamericana.

Goesaert, H., Briis, K., Veraverbeke, W.S., Courtin, C.M., Gebruers, K., Delcour, J.A. 2005. Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. Review. Trends in Food Science & Technology (16) 12-30.

- Gómez, M.H., Rooney, L.W., Waniska, R.D., Pflugfelder, R.L. 1987. Dry corn masa flours for tortilla and snack food production. *Cereal Foods World* 32, 372.
- Hareland, G.A. 1994. Evaluation of flour particle size distribution by Laser Diffraction, sieve analysis and Near-Infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Cereal Science* (21) 183-190.
- Haynes, L.C., Bettge, A.D., Slade, L. 2009. Soft wheat and flour products methods review: Solvent retention capacity equation correction. *AACC International Report* (54) 174-175.
- Hidalgo, A., Fongaro, L., Brandolini, A. 2014. Wheat flour granulometry determines colour perception. *Food Research International* (64) 363-370.
- Hoseney, R.C. 1994. *Principles of Cereal Science and Technology*, 2nd Ed. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, MN, USA.
- Hu, Xin-Zhong., Zheng, Jian-Mei., Li, Xiao-Ping., Xu, Chao., Zhao, Qiong. 2014. Chemical composition and sensory characteristics of oat flakes: A comparative study of naked oat flakes from China and hulled oat flakes from western countries. *Journal of Cereal Science* (60) 297-301.
- Hüttner, E.K., Dal Bello, F., Arendt, E.K. 2010. Rheological properties and bread making performance of commercial wholegrain oat flours. *Journal of Cereal Science* (52) 65-71.
- Imberty, A., Chanzy, H., Pérez, S., Bulèon, A., Tran, V. 1988. The double helical nature of the crystalline part of A-starch. *Journal of Molecular Biology* Vol. 201 (2) 365-378.
- ISO 13320-1. 1999. Particle size analysis-Laser diffraction methods. Part I: General principles.
- Jelaca, S.L., Hlynka, I. 1971. Water-binding capacity of wheat flour crude pentosans and their relation to mixing characteristics of dough. *Cereal Chemistry* (48) 211-222.

Kent, N.L., Evers A.D. 1994. Technology of cereals: an introduction for students of food science and agriculture. 4th Ed. Pergamon.

Labuza, T.P., Busk, C.G. 1979. An analysis of the water binding in gels. Journal of Food Science (44) 1379-1385.

Larsen, R.A. 1964. Hydration as factor in bread quality. Cereal Chemistry (41) 181-187.

Lee, W.J., Pedersen, J.F., Shelton, D.R. 2002. Relationship of sorghum kernel size to physiochemical, milling, pasting, and cooking properties. Food Research International (35) 643-649.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), España. Informe Industria Alimentaria 2012-2013.

Mesas, J.M., Alegre, M.T. 2002. El pan y su proceso de elaboración. Ciencia y Tecnología Alimentaria. Vol. 3, No. 5, 307-313.

Mohamed, A., Biresaw, G., Xu, J., Hojilla-Evangelista, M.P., Rayas-Duarte, P. 2009. Oats protein isolate: Thermal, rheological, Surface and functional properties. Food Research International (42) 107-114.

Ponzio, N.R. 2010. Calidad panadera de variedades de trigo puras y sus mezclas. Influencia del agregado de aditivos. Tesis de maestría. Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

Posner, E. S. 2009. Wheat flour milling. In K. Khan, & P. R. Shewry (Eds.), Wheat chemistry and technology (Pp. 119–152) (4th Ed.). St Paul, MN, USA: AACC International.

Prabhasankar, P., Sudha, M.L., Haridas Rao, P. 2000. Quality characteristics of wheat flour milled streams. Food Research International (33) 381-386.

Ragaei, S., Aal, E.M.A. 2006. Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. Food Chemistry (95) 9-18.

Ram, S., Dawar, V., Singh, R.P., Shoran, J. 2005. Application of solvent retention capacity test for the prediction of mixing properties of wheat flour. *Journal of Cereal Science* (42) 261-266.

Rasper, V.F., De Man, J.M. 1980. Measurement of hydration capacity of wheat flour/starch mixtures. *Cereal Chemistry* (57) 27-31.

Ruffet, M.J. 1994. Break roller mill performances. In: Primary cereal processing. Godon, B. and Willm, C. Eds. VCH Publishing: New York. Pp. 189-210.

Schubert, H. 1987. Food particle technology, Part 1: properties of particles and particulated food systems. *J. Food Eng.* (6) 1-32.

Shittu, T.A., Raji, A.O., Sanni, L.O. 2007. Bread from composite cassava-wheat flour: I. Effect of baking time and temperature on some physical properties of bread loaf. *Food Research International* (40) 280-290.

Symons, S.J., Dexter, J.E. 1991. Computer analysis of fluorescence for the measurement of flour refinement as determined by flour ash content, flour grade color, and tristimulus color measurements. *Cereal Chemistry* (68) 454-460.

Singh, M., Liu, S.X., Vaughn, S.F. 2013. Effect of corn bran particle size on rheology and pasting characteristics of flour gels. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* (2) 138-142.

Slade, L., Levine, H. 1994. Structure-function relationships of cookies and cracker ingredients. In: Faridi, H. (Ed.). *The science of cookies and cracker production*. Chapman & Hall, New York. Pp. 23-141.

Tadeu-Paraginski, R., Levien-Vanier, N., Berrios, J.J., De Oliveira, M., Cardoso-Elias, M. 2014. Physicochemical and pasting properties of maize as affected by storage temperature. *Journal of Stored Products Research* (59) 209-214.

Toth, A., Prokisch, J., Sipos, P., Sizeles, E., Mars, E., Gyori, Z. 2005. Effects of particle size on quality of winter wheat flour, with a special focus on macro- and microelement concentration. *Soil Sci. Plant Anal.* (37) 2659-2672.

Varela, G., Carbajal, Á., Monteagudo, E., Moreiras, O. 1991. *El pan en la alimentación de los españoles*. EUDEMA S.A. Ediciones de la Universidad Complutense S.A.

Villarino, C.B.J., Jayasena, V. Coorey, R., Chakrabarti-Bell, S., Johnson, S.K. 2015. The effects of Australian sweet lupin (ASL) variety on physical properties of flours and breads. *LWT-Food Science and Technology* (60) 435-443.

Wang, L., Flores, R.A. 2000. Effects of flour particle size on the textural properties of flour tortillas. *Journal of Cereal Chemistry* (31) 263-272.

Zaidul, I.S.M, Karim, A.A., Manan, D.M.A. Norulaini, N.A.N, Omar, A.K.M. 2003. Gelatinization properties of sago and wheat flour mixtures. *ASEAN Food Journal* (12) 585-598.

Zhou, M., Robards, K., Glennie-Holmes, M., Helliwell, S. 1999. Effects of oat lipids on groat meal pasting properties. *J. Sci. Food Agric.* (79) 585-592.

Zhou, M., Robards, K., Glennie-Holmes, M., Helliwell, S. 2000. Effects of enzyme treatment and processing on pasting and thermal properties of oats. *J. Sci. Food Agric.* (80) 1486-1494.

CAPÍTULO II

***ESTUDIO DE LA PANIFICACIÓN UTILIZANDO HARINA
DE TRIGO SUSTITUIDA PARCIALMENTE POR HARINA
DE AVENA, MAÍZ O SORGO***

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de tecnologías de transformación de granos que favorecen de manera considerable la elaboración de una gran cantidad de productos que aportan propiedades beneficiosas para la salud ha generado un incremento importante en la elaboración de productos de harina de trigo sustituidas con harinas obtenidas de otros granos, ya que estos pueden aportar componentes como fibra, proteínas, aceites esenciales y componentes bioactivos derivados de la transformación propia de estos granos enteros.

La FAO define a las harinas compuestas como aquellas mezclas elaboradas para producir alimentos a base de trigo, como pan, pastas y galletas. Estas harinas pueden prepararse a base de otros cereales diferentes al trigo o de otras fuentes de origen vegetal, y pueden o no contener harina de trigo. Las condiciones generales de procesamiento y el producto final obtenido puede ser comparable a los elaborados solo de trigo, pero también pueden presentar diferencias, entre ellas las características reológicas (Elías, 1999).

En muchos países, el consumo de pan está incrementando continuamente y en la mayoría de estos la elaboración del pan y productos derivados de trigo ha generado la necesidad de importar este grano, dado que la producción interna no es suficiente, ya sea por condiciones climáticas y/o de suelo que no permite el crecimiento del grano adecuadamente o representa dificultades para su desarrollo. Por esta razón es que surge la necesidad de reemplazar el trigo con otras harinas obtenidas en las propias regiones (Seibel, 2006). Sin embargo, además de lo anterior y los altos costos del trigo regido por mercados internacionales son puntos a considerar cuando utilizamos este cereal en la producción de pan y sus derivados, lo que nos hace buscar alternativas en la utilización de otros cereales para elaborar productos más accesibles o de menor costo a la población.

Dentro de estas harinas vegetales empleadas en la sustitución de harina de trigo con la finalidad de mejorar las características nutrimentales, organolépticas e incluso bajar los costos de producción se encuentran principalmente las harinas de granos de sorgo, mijo, gluten de maíz, harinas

de germen de maíz desgrasado, harinas de maíz germinado, avena, centeno, triticale, arroz, amaranto, harina de tapioca, cebada e incluso los destilados de cerveza, entre otras (Chavan et al., 1993).

Pero la sustitución de la harina de trigo por otras, puede generar cambios importantes a tener en cuenta. Se ha observado que la sustitución de harina de trigo disminuye la elasticidad de la masa. Es por ello que sustituciones de 10 a 20% de harina de trigo han demostrado producir pan de calidad aceptable sin un impacto importante en el color, estructura de la miga, textura y vida de anaquel (Seibel, 2006; Mepba et al., 2007). Estudios realizados por Falade y Akingbala (2008), al elaborar pan con harinas compuestas de 10% de casava y 90% de trigo observaron un comportamiento muy favorable con respecto al pan elaborado solamente de harina de trigo. Aunque el gluten, componente muy importante en panificación, sufre una dilución por sustitución, muchas de las harinas alternativas tienen propiedades que complementan al gluten (Ohimain, 2015).

Otros investigadores han empleado la harina de germen de maíz para combinarla con la harina de trigo. Tsen et al., (1974), adicionaron hasta un 12% de harina elaborada de germen de maíz a la harina de trigo, utilizando como surfactante SSL (Estearil-2-Lactilato de Sodio) para producir pan con textura y sabor aceptable. Otro cereal que se ha empleado para realizar esta sustitución ha sido la avena, la cual aparte de incrementar el contenido de proteína le da al pan una sensación de frescura y mayor vida de anaquel, impartándole una apariencia visual más agradable al consumidor. Además la avena, por sus características, puede utilizarse dentro de un rango más amplio en la elaboración de diferentes productos de panificación (Chavan et al., 1993).

Sin duda son muchas las ventajas que trae consigo una buena sustitución de las harinas de trigo, desde el punto de vista nutrimental incrementando los contenidos de proteínas, amino ácidos esenciales, minerales, fibra dietaria u otros nutrientes que son importantes para el buen funcionamiento de nuestro organismo. Sin embargo, es muy importante encontrar las proporciones adecuadas para obtener harinas con parámetros de calidad

adecuados, variables de procesado adecuadas a los diferentes tipos de harina, que conlleven a la obtención de productos que sean agradables para el consumidor desde el punto de vista organoléptico y por supuesto que incrementen sus propiedades nutrimentales. Otro punto muy importante es hacer consideraciones desde el punto de vista económico ya que el grano de trigo está en fluctuaciones constantes de su precio de acuerdo a su manejo en mercados internacionales. Es por ello, muy importante considerar los ahorros que podrían beneficiar al productor de harinas, o al fabricante de productos a base de harinas de trigo, el reemplazar una parte de ellas por otras opciones de harinas que además de sus beneficios nutrimentales, involucre un producto final de buenas características organolépticas y de buena aceptabilidad por el consumidor y que a su vez baje los costes de las materias primas con que se elaboran dichos productos.

Así el objetivo planteado en el presente capítulo es el estudio del uso de mezclas binarias de harinas de trigo sustituidas parcialmente con harinas de avena, maíz o sorgo. El estudio se centra en evaluar diferentes grados de sustitución de harina de trigo y su efecto sobre las masas y panes elaborados con ellas, sin la adición de mejorantes panarios, con la finalidad de establecer conocimientos en aras a posibles modificaciones del proceso que incrementen, en su caso, las características panarias de estas.

MATERIALES Y MÉTODOS

II.2.1 Materias primas

Las harinas utilizadas para desarrollar este capítulo fueron las mismas harinas de trigo (HT), avena (HA), maíz (HM) y sorgo (HS), utilizadas y caracterizadas en el capítulo anterior. Además para la realización de las experiencias también se utilizó aceite de girasol (acidez máxima 0.2º Koipesol Semillas, S.L. España), levadura (*Saccharomyces cerevisiae*, Lesafre Ibérica, S.A. España), azúcar blanca ($\geq 99.8\%$ of sacarosa, Azucarera Ebro, S.L. España) y NaCl (sal marina refinada $\geq 97\%$ NaCl Salinera Española. S.A. España), todas ellas compradas en una tienda local.

II.2.2 Caracterización de las mezclas binarias de harinas

La caracterización de las mezclas binarias de las harinas se realizó empleando las mismas técnicas descritas en el capítulo anterior. Para ello se determinó la distribución del tamaño de partícula (DTP) (Villarino et al., 2015), color (Gilabert, 2002), capacidad de retención de agua (método 56-11; AACC, 2000) y análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA) método 76-21 (AACC, 2000) (Shittu et al., 2007). Las formulaciones binarias que se evaluaron se basaron en la mezcla de la HA, HM o HS con la HT en las proporciones siguientes: 2.5/97.5, 5/95, 7.5/92.5 y 10/90 (peso/peso), respectivamente.

II.2.3 Análisis en masas

II.2.3.1 Fuerza (F), extensibilidad (E) y trabajo de deformación (TD)

La masa utilizada para llevar a cabo la medición de fuerza (F), extensibilidad (E) y trabajo de deformación (TD) se obtuvo a partir del análisis mediante Mixografo (National Mfg. Co. Lincoln, NE, USA). Así conocidos los valores de humedad y proteína de las harinas se calculó la cantidad de agua y harina

para llevar a cabo el amasado en el Mixografo de acuerdo al método 82-23 (AACC, 1995), y así obtener el tiempo óptimo de desarrollo de la masa, la cual fue utilizada para la realización de los análisis. La masa obtenida anteriormente se colocó en una plataforma ranurada y sobre esta se colocó otra plataforma sin ranuras, prensándose por aproximadamente 30 s para formar las tiras de masas las cuales se introdujeron en una estufa (Laboratory Oven, Cole Parmer, Modelo 05015-50, Niles, Illinois) a 30°C por 45 min (Ktenioudaki et al., 2013). Al cabo de este tiempo se realizó la medición de F, E y TD a una velocidad de prueba de 3.3 mms⁻¹. La medición de los parámetros mencionados anteriormente se llevó a cabo siguiendo la técnica descrita por Kieffer et al., (1998), utilizando un analizador de textura (TA-XT2, SMS/Kieffer dough extensibility Rig Stable Micro Systems, Godalming, Surrey, England). El analizador de textura se calibró con una pesa de 5 kg. Esta prueba se hizo por duplicado con 7 mediciones por repetición.

II.2.3.2 Capacidad fermentativa

Para realizar esta medición se elaboró la masa de la siguiente manera: Se colocaron 126 g de agua, 7.4 g de aceite, 4 g de sal y 14.8 g de azúcar en el tazón de la amasadora y se mezcló por 2 min a velocidad 3 (Thermomix Vorwerk, Wuppertal, Alemania). Transcurrido este tiempo se agregó 8.4 g de levadura y se procedió a mezclar durante 30 s. Después se adicionaron 110 g de harina y se mezclaron por 30 s, incorporándose finalmente el resto de la harina (105 g), mezclando durante 4.5 min más a 37°C. El programa del equipo está enfocado a la mezcla de los ingredientes por medio de unas hélices que giran al azar en ambas direcciones a una velocidad de 550 rpm, con el objetivo de obtener una masa homogénea. Para llevar a cabo la medición del volumen se tomaron 70 g de la masa que se colocaron en un tubo cilíndrico graduado de vidrio (Soleimani Pour-Damanab et al., 2011) (5.5 cm de diámetro y 15.5 cm de alto), el cual se introdujo a la cámara de fermentación (Modelo KBF720 Binder, Tuttlingen, Alemania) con humedad relativa y temperatura controlada (90% HR y 40°C) por una hora. Mediante

el registro del volumen inicial de la masa y el obtenido a la hora de fermentación se calculó la capacidad de la masa para ser fermentada.

II.2.4 Análisis en pan

II.2.4.1 Elaboración

La elaboración de la masa se realizó siguiendo el protocolo descrito anteriormente. Las proporciones de los componentes que la formaron fueron de: 288.3 g de agua, 16.9 g de aceite, 9.2 g de sal, 33.9 g de azúcar, 19.2 g de levadura y 492 g de la mezcla de harina (262 g de harina que se mezclaron en una primera etapa por 30 s, y 230 g que se adicionaron después). Para la fermentación se tomaron 250 g de masa que se colocaron en el molde de panificación, el cual se introdujo en la cámara de fermentación (90% HR y 40°C) por una hora. Para finalmente panificar en horno (Modelo Fagor 2CF-3V) a 200°C por 15 min.

II.2.4.2. Pérdida de peso durante el horneado

Para determinar la pérdida de peso del pan durante su horneado este fue pesado en una balanza (Modelo Kern 440-49N, Ziegelei, Alemania) antes y después de su horneado (tras un periodo de enfriado).

II.2.4.3 Análisis de perfil de textura (TPA, Texture Profile Analysis)

Para realizar esta medición se cortó la miga en cilindros de 4 cm de alto y diámetro de 3.1 cm. Se empleó el Texturometro TA-XT Plus (Texture Analyser Stable Micro Systems, Surrey, UK). Se utilizó la celda de carga de 25 kg con el dispositivo TA-40 (40 mm de diámetro). La velocidad del ensayo fue de 1.7 mm/s para comprimir la miga el 50% de su altura. El tiempo entre las compresiones fue de 5 s. Los parámetros obtenidos fueron: dureza,

elasticidad, cohesividad, gomosidad, masticabilidad y resiliencia (Verdú et al., 2015).

II.2.4.4 Actividad de agua (a_w)

De la miga del pan frío se tomó un disco de 4 cm de diámetro y un espesor aproximado de 5 milímetros para realizar el análisis. Para ello se utilizó el equipo AquaLab Dew Point Water Activity Meter 4TE (Pullman, WA, USA), realizando el análisis por triplicado.

II.2.4.5 Determinación de color

Para la realización de este análisis, la miga obtenida de cada uno de los tratamientos se secó a 46°C por 17 h en un deshidratador (Modelo Excalibur Food Dehydrator, Sacramento CA, USA). Posteriormente se molió en un molino de café (Modelo Carrefour Home) para obtener la harina de la miga. La medición del color se realizó siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior.

II.2.4.6 Análisis sensorial

El análisis sensorial se realizó sobre los 13 panes elaborados, un control hecho con harina de trigo (HT) y los 12 restantes elaborados con las tres sustituciones parciales utilizando las harinas de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS) en las 4 proporciones estudiadas 2.5/97.5, 5/95, 7.5/92.5 y 10/90 (peso/peso). Dado que el número de panes fue elevado, las catas se tuvieron que realizar durante varios días, las cuales fueron llevadas a cabo por 24 panelistas no entrenados que determinaron su preferencia sobre cada una de las formulaciones empleadas en la elaboración del pan. Los atributos analizados fueron: color, aroma, textura al tacto, apariencia, sabor, textura en boca y apreciación general. Para cada uno de los atributos se estableció

una escala que fue de muy desagradable a muy agradable en la que los catadores señalaron su grado de preferencia.

II.2.5 Análisis estadístico

Los resultados se analizaron aplicando un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Para discriminar entre las medias se utilizó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. El Análisis estadístico se llevó a cabo con el programa Statgraphics Centurion XVI con un nivel de confianza del 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

II.3.1 Caracterización de las mezclas binarias de harinas

II.3.1.1 Distribución de tamaño de partícula (DTP)

Los resultados obtenidos para la distribución del tamaño de partícula se pueden observar en la Tabla II.1. El tamaño de partícula de las harinas expresado como el volumen medio ponderado ($D[4,3] \mu\text{m}$), fue mayor para todas las combinaciones de harinas con respecto a la HT (99.42 ± 0.88), a excepción de la combinación HT: HS 2.5% que presentó el mismo valor que HT (98.55 ± 0.87). Al analizar los resultados obtenidos con la sustitución con HA se observó cómo los tres primeros niveles de sustitución (2.5, 5 y 7.5%) no generaron diferencias significativas entre ellas, si en cambio con el nivel de sustitución 10% el cual presentó el mayor tamaño de partícula (114.21 ± 3.74). Cuando la sustitución fue realizada con la harina HM, no existieron diferencias estadísticas entre los dos primeros niveles de sustitución, siendo los valores obtenidos iguales que los obtenidos para los mismos niveles pero con HA. Para las dos sustituciones más elevadas (7.5 y 10%) tampoco existieron diferencias estadísticas entre ellas, siendo los valores obtenidos de 107.14 ± 0.36 y 111.87 ± 3.37 , respectivamente. Al analizar la sustitución con HS, si bien como se ha comentado anteriormente la sustitución al 2.5% no presentó diferencias estadísticas con la HT, el resto sí que las presentaron, aunque los valores obtenidos para cada una de las sustituciones fueron los menores para las tres harinas analizadas, siendo los valores a 5, 7.5 y 10% de 101.39 ± 0.15 , 103.89 ± 0.68 y 106.48 ± 0.5 , respectivamente.

El tamaño de partícula es considerado un criterio importante que afecta la calidad y sabor de productos alimenticios, que puede tener un efecto importante en las características funcionales, además de las propiedades texturales de los alimentos. Estudios realizados por Singh et al., (2013) utilizando fibra de maíz observó aumentos significativos en la capacidad de retención de agua al reducir el tamaño de partícula. Estudios realizados por Gómez et al., (1987) coincidió con esta observación, atribuyéndole a partículas de menor tamaño como las responsables de mayor absorción de

agua, viscosidad, plasticidad y la suavidad de la masa. La variación de la distribución del tamaño de partícula puede ser atribuida a diferencias en la matriz almidón-proteína del endospermo de los cereales, en este sentido, Glenn y Saunders (1990), reportaron que trigos duros y suaves varían en la continuidad de la matriz proteica, la adhesión almidón-proteína y los espacios intracelulares dentro del endospermo.

Tabla II.1. Distribución del tamaño de partícula (DTP) de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.

<i>Harina</i>	<i>d(0.1) μm</i>	<i>d(0.5) μm</i>	<i>d(0.9) μm</i>	<i>D[4,3] μm</i>
Trigo	25.53 ± 1.15 a	92.32 ± 0.63 a	181.11 ± 0.80 a	99.42 ± 0.88 a
<i>HT: HA 2.5%</i>	24.92 ± 0.12 d	97.20 ± 0.20 d	189.18 ± 0.85 ef	103.80 ± 0.35 d
<i>HT: HA 5%</i>	25.85 ± 0.19 ab	97.65 ± 0.50 d	187.71 ± 1.00 g	103.93 ± 0.54 d
<i>HT: HA 7.5%</i>	24.58 ± 0.12 d	97.27 ± 0.64 d	191.27 ± 2.40 de	104.36 ± 1.14 d
<i>HT: HA 10%</i>	23.25 ± 0.23 e	96.02 ± 0.77 e	200.73 ± 2.87 b	114.21 ± 3.74 f
<i>HT: HM 2.5%</i>	24.74 ± 0.50 d	95.8 ± 1.52 ef	193.12 ± 2.75 d	104.41 ± 1.55 d
<i>HT: HM 5%</i>	26.32 ± 0.17 bc	99.06 ± 0.35 c	189.62 ± 0.98 ef	105.31 ± 0.44 cd
<i>HT: HM 7.5%</i>	26.50 ± 0.15 c	100.25 ± 0.29 b	193.88 ± 0.74 cd	107.14 ± 0.36 b
<i>HT: HM 10%</i>	26.24 ± 0.68 ab	102.36 ± 2.84 g	205.82 ± 6.15 h	111.87 ± 3.37 b
<i>HT: HS 2.5%</i>	22.97 ± 0.13 e	90.81 ± 0.56 h	183.08 ± 1.75 a	98.55 ± 0.87 a
<i>HT:HS 5%</i>	23.17 ± 0.05 e	92.27 ± 0.14 a	189.81 ± 0.40 ef	101.39 ± 0.15 e
<i>HT: HS 7.5%</i>	22.87 ± 0.33 e	93.38 ± 0.60 a	196.43 ± 1.13 c	103.89 ± 0.68 d
<i>HT: HS 10%</i>	23.18 ± 0.33 e	94.77 ± 0.43 f	201.98 ± 0.90 b	106.48 ± 0.50 bc

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. El % observado en la tabla indica el grado de sustitución de HT. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

La reducción de tamaño de partícula puede tener efectos importantes sobre los cambios físico-químicos, que generan un aumento de la superficie de contacto de las partículas, y estos pueden afectar la calidad de los alimentos. Hareland (1994), concluyó que la distribución del tamaño de partícula de HT depende de la dureza y de la clase del trigo, además del tipo de molino y tiempo de molienda del trigo.

II.3.1.2 Determinación de color de las harinas

Los resultados obtenidos en la medición del color se presentan en la Tabla II.2. Los valores de L* (luminosidad) se vieron afectados por el incremento en el % de sustitución. Se observó que al incrementar el % de sustitución el valor de L* disminuyó en todas las mezclas. Los valores mayores fueron obtenidos en la HT (95.94 ± 0.17), seguido de la mezcla HT: HS 2.5% (95.25 ± 0.15), HT: HM 2.5% (95.14 ± 0.41), HT: HA 2.5% (95.10 ± 0.09).

En lo que respecta a la medición de a* (variación de rojo a verde), todas las mediciones mostraron diferencias significativas con respecto a HT (4.58 ± 0.08). Al analizar los resultados al emplear HA, los valores obtenidos fueron más bajos que los de HT, estando los valores comprendidos en un rango de 4.31 a 4.34, sin mostrar diferencias significativas entre ellos, pero con un ligero incremento al incrementar el nivel de sustitución de HA. En cambio el comportamiento fue contrario cuando se utilizó HM, disminuyendo el valor de a* al incrementar el nivel de sustitución, pero en todos los casos con valores más bajos que los de HT. Al utilizar HS en la sustitución se observó un comportamiento similar al de HA, incrementando a* al aumentar el nivel de sustitución. Los valores más altos fueron observados al utilizar este cereal en porcentajes de 10% (4.67 ± 0.23). En lo que respecta a la medición de b* (variación de amarillo a azul) el valor obtenido por HT (2.76 ± 0.09) mostró diferencias significativas con respecto al resto de las mediciones, siendo mayor en todas las ocasiones, Para todas las harinas se produjo un incremento del valor de b* al incrementar el porcentaje de sustitución. Valores muy semejantes fueron los que se obtuvieron al utilizar HA o HS, mientras que los valores más elevados y de manera muy evidente fueron obtenidos al utilizar HM en sus diferentes porcentajes: HT: HM 2.5% (3.89 ± 0.14), HT: HM 5% (4.55 ± 0.16), HT: HM 7.5% (5.16 ± 0.13) o HT: HM 10% (5.94 ± 0.19).

Los valores de Croma (describe lo llamativo o apagado de un color) también en función del tipo de harina utilizado y del grado de sustitución. Para todas las mezclas se observó un incremento de C* al aumentar el nivel de sustitución. Para C* los valores obtenidos para HA no presentaron

diferencias significativas con HT, si en cambio cuando se utilizó HM Y HS, alcanzándose los valores mayores cuando HT fue sustituida 5, 7.5 y 10% con HM (6.11 ± 0.12), (6.54 ± 0.09) y (7.11 ± 0.17), respectivamente. En lo que se refiere a H* (que indica tono) también incrementó, con respecto al valor de HT, al aumentar el % de sustitución con las diferentes mezclas de harinas, siendo más evidente cuando fue utilizada HM que presentó los mayores valores.

Tabla II.2. Resultados de color de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.

<i>Harina</i>	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>	<i>C*</i>	<i>H*</i>
Trigo	95.94 ± 0.17 a	4.58 ± 0.03 a	2.76 ± 0.09 a	5.37 ± 0.02 ah	31.46 ± 0.52 a
HT: HA 2.5%	95.10 ± 0.09 bcd	4.31 ± 0.02 d	2.99 ± 0.05 h	5.27 ± 0.04 h	34.58 ± 0.52 g
HT: HA 5%	94.81 ± 0.78 bcde	4.32 ± 0.05 d	3.14 ± 0.09 fg	5.35 ± 0.07 h	36.02 ± 0.79 f
HT: HA 7.5%	94.65 ± 0.29 e	4.33 ± 0.04 d	3.15 ± 0.07 fg	5.39 ± 0.05 h	36.12 ± 0.71 f
HT: HA 10%	93.95 ± 0.37 f	4.34 ± 0.01 d	3.35 ± 0.11 e	5.48 ± 0.08 af	37.62 ± 0.88 e
HT: HM 2.5%	95.14 ± 0.41 bc	4.16 ± 0.02 e	3.89 ± 0.14 d	5.70 ± 0.09 d	43.12 ± 1.22 d
HT: HM 5%	95.02 ± 0.34 bcde	4.08 ± 0.01 f	4.55 ± 0.16 c	6.11 ± 0.12 c	48.14 ± 1.12 c
HT: HM 7.5%	94.98 ± 0.24 bcde	4.02 ± 0.03 f	5.16 ± 0.13 b	6.54 ± 0.09 b	52.01 ± 0.89 b
HT: HM 10%	94.71 ± 0.33 cde	3.86 ± 0.10 g	5.94 ± 0.19 i	7.11 ± 0.17 g	56.73 ± 0.81 j
HT: HS 2.5%	95.25 ± 0.15 b	4.61 ± 0.03 ab	2.99 ± 0.03 h	5.50 ± 0.04 ef	32.91 ± 0.34 i
HT: HS 5%	94.67 ± 0.24 de	4.62 ± 0.02 bc	3.02 ± 0.04 gh	5.51 ± 0.02 ef	33.23 ± 0.42 hi
HT: HS 7.5%	94.19 ± 0.38 f	4.64 ± 0.02 bc	3.13 ± 0.05 fg	5.60 ± 0.05 de	34.06 ± 0.55 gh
HT: HS 10%	93.80 ± 0.06 f	4.67 ± 0.23 c	3.24 ± 0.05 ef	5.68 ± 0.04 d	34.73 ± 0.40 g

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo; C*, cromas; H*, valor Hue. El % observado en la tabla indica el grado de sustitución de HT. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

Diferentes investigadores han coincidido que los valores obtenidos anteriormente pueden estar influenciados por el contenido de carotenoides y características genotípicas (Brandolini et al., 2008), además de las condiciones ambientales (Hidalgo et al., 2009), stress durante la producción del grano (Fратиanni et al., 2013; Hidalgo et al., 2009; Lachman et al., 2013), molienda (Posner, 2009) y las condiciones de almacenamiento (Hidalgo y Brandolini, 2008b). Es un hecho que el procedimiento de molienda y la velocidad de extracción tienen un efecto importante en los diferentes componentes de las harinas, tales como ceniza, proteína, pigmentos y en el

contenido de almidón dañado, los cuales tienen influencia importante en el color, además del tamaño de partícula de las harinas, dureza del grano y contenido de humedad son otras posibles fuentes que pueden influir en la medición de color en las harinas.

II.3.1.3 Capacidad de retención de agua (CRA)

En harinas de trigo esta propiedad es utilizada para determinar su calidad y capacidad para formar una masa visco-elástica, la cual es fundamental en la industria de los alimentos ya que puede determinar sus propiedades funcionales. La Figura II.1 muestra los resultados relacionados con la capacidad de retención de agua (CRA) de las mezclas de harinas obtenidas cuando la HT fue sustituida con HA, HM o HS. En lo que respecta a esta medición se observaron diferencias significativas en los resultados obtenidos. Los resultados mostraron una tendencia a disminuir la CRA con el incremento del % de sustitución, a excepción de las combinaciones realizadas con la harina HS. Cuando la sustitución fue realizada con esta harina, para los dos primeros niveles de sustitución 2.5 y 5% se produjo un incremento en la CRA siendo los valores obtenidos de 70.61 ± 0.14 y 71.54 ± 0.12 respectivamente, frente al valor de 69.15 ± 0.06 de la HT. Las sustituciones con la HA, si bien para los dos primeros niveles de sustitución no se observaron diferencias con la HT, sí que las presentaron las dos superiores, siendo los valores de 67.58 ± 0.15 y 66.50 ± 0.36 . Las mezclas con HM fueron las que presentaron los menores valores, variando los resultados obtenidos de 67.30 ± 0.37 para la mezcla con un 2.5% al de 65.77 ± 1.01 para la de 10%.

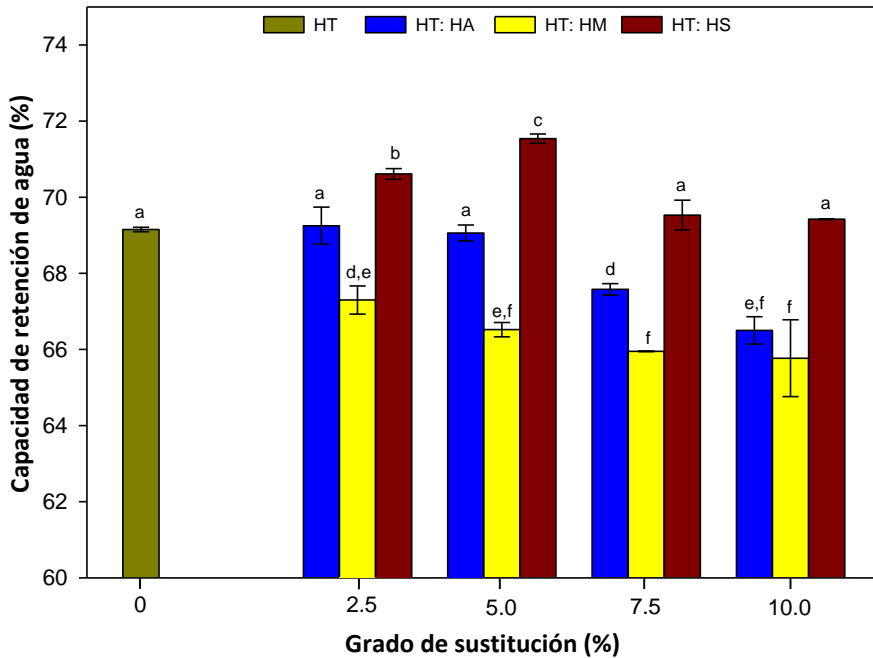


Figura II.1. Capacidad de retención de agua (CRA) de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).

Estudios realizados por Berton et al., (2002), concluyeron que la CRA depende del grado de molienda y el método usado, además observaron que la variación en el contenido de almidón dañado es el factor principal de incremento en la variación de la capacidad de retención de agua en las harinas. Esta prueba nos da una predicción de la funcionalidad de las harinas, así como, la habilidad que tienen para absorber agua durante el proceso de mezclado y su habilidad para liberar esa agua durante el proceso de panificación. También nos da idea del refinamiento de las harinas dado que al reducir el tamaño de partícula se genera un incremento en el almidón dañado, lo cual afecta negativamente la capacidad de la harina para el desarrollo del producto final. Los resultados obtenidos nos muestran un intervalo entre las harinas que va de 65.77 a 71.64%, con bastante semejanza a los obtenidos por Ram et al., (2005) que trabajaron sobre la capacidad de retención de agua en harinas de trigo obteniendo valores de 53.4 a 70.6%.

Otros resultados muy semejantes a los comentados son los obtenidos por Pasha et al., (2009) que al trabajar con harinas de trigo obtuvo rangos de 59.06 a 77.96%. Los rangos obtenidos en nuestro estudio fueron de 65.77 a 71.54% guardando bastante similitud con los rangos mencionados anteriormente.

II.3.1.4 Análisis de viscosidad de las harinas: Rapid Visco Analyser (RVA)

Normalmente al referirnos al RVA lo relacionamos con el comportamiento del almidón, sin embargo, existen otros componentes muy importantes que están involucrados en esta prueba como son proteínas y lípidos. Estos componentes interactúan con el almidón y afectan la medición de viscosidad en el RVA (Batey, 2009). En este caso se estableció el perfil de viscosidad de HT sustituida con HA, HM o HS utilizando el RVA.

La Figura II.2 muestra el desarrollo del análisis de viscosidad obtenido con el RVA que se generó al sustituir la HT con HA en sus cuatro diferentes grados de sustitución (2.5, 5, 7.5 o 10%). Como se puede apreciar, según el grado de sustitución se generaron pequeños cambios, los cuales fueron más acusados cuando las harinas utilizadas fueron HM (Figura II.3) y más aún cuando se utilizó la HS (Figura II.4).

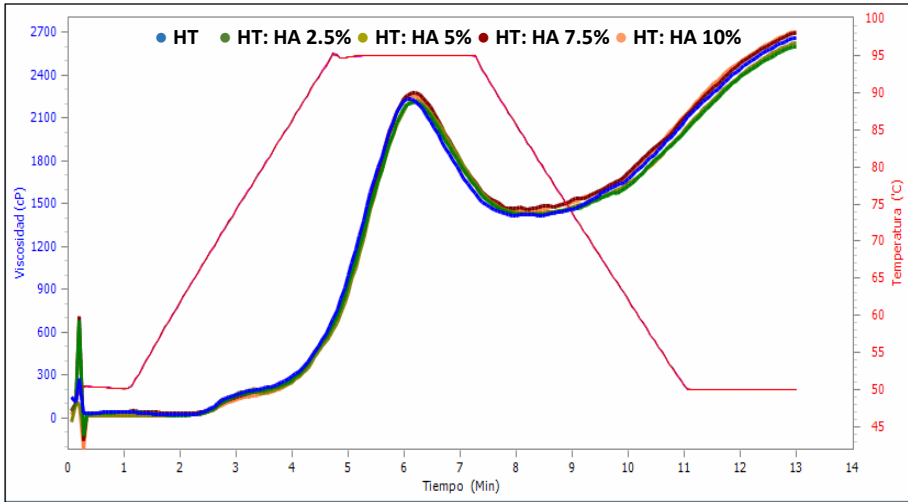


Figura II.2. Desarrollo de viscosidad generada por la sustitución de HT con HA en los diferentes niveles (2.5, 5, 7.5 o 10%).

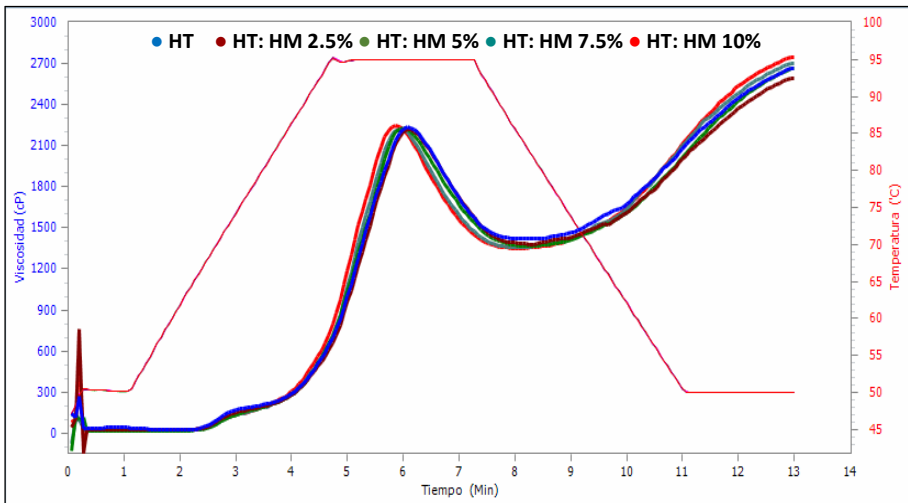


Figura II.3. Desarrollo de viscosidad generada por la sustitución de HT con HM en los diferentes niveles (2.5, 5, 7.5 o 10%).

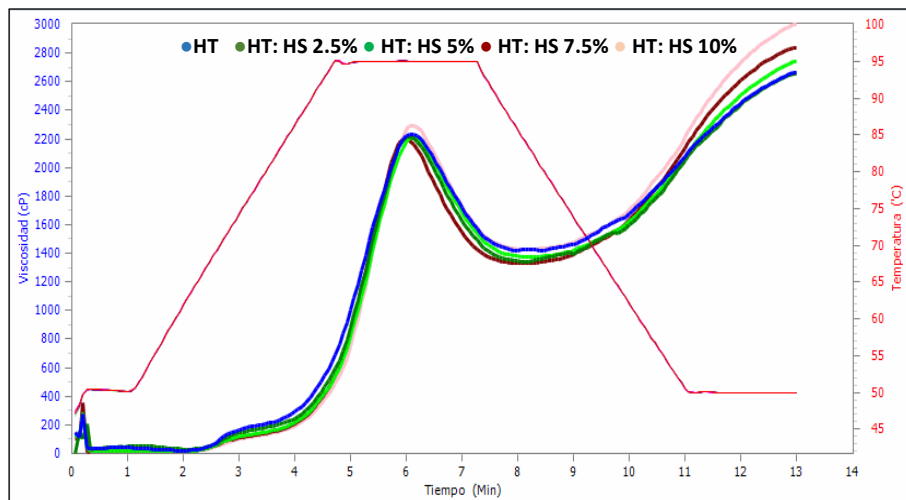


Figura II.4. Desarrollo de viscosidad generada por la sustitución de HT con HS en los diferentes niveles (2.5, 5, 7.5 o 10%).

A partir de los valores obtenidos en los ensayos se procedió al estudio de los parámetros temperatura de empaste (T_e), viscosidad pico (V_p), viscosidad final (V_f), viscosidad mínima (V_m), viscosidad ruptura (V_{rup}) y viscosidad restitución (V_r).

La Figura II.5 nos muestra los resultados obtenidos en esta medición. Cuando el nivel de sustitución, independientemente del tipo de harina utilizada, fue del 2.5%, los valores de " T_e " fueron similares a los de la HT (68.95 ± 0.64), no evidenciándose diferencias significativas. En cambio sí se obtuvieron valores significativamente superiores a partir de un nivel de sustitución del 5% a excepción de la sustitución con HA que presentó un valor similar a la HT (70.18 ± 0.04). A partir de este nivel de sustitución los valores de este parámetro ya no sufrieron variaciones siendo constante para los niveles de sustitución 7.5 y 10%. De las tres harinas sustitutorias, los mayores valores de " T_e " se obtuvieron cuando se utilizó HS al 5% (87.28 ± 0.04), 7.5% (87.25 ± 0.07) y 10% (87.6 ± 0.57). El incremento en la " T_e " refleja la limitación del gránulo de almidón a hincharse durante la hidratación, bajo las condiciones de calentamiento y agitación de la prueba, el incremento en enlaces disulfuro dentro de la estructura de las proteínas y la pérdida en la proporción de

proteínas solubles asociadas con el almidón pueden retardar el hinchamiento del gránulo (Tadeu-Paraginski et al., 2014).

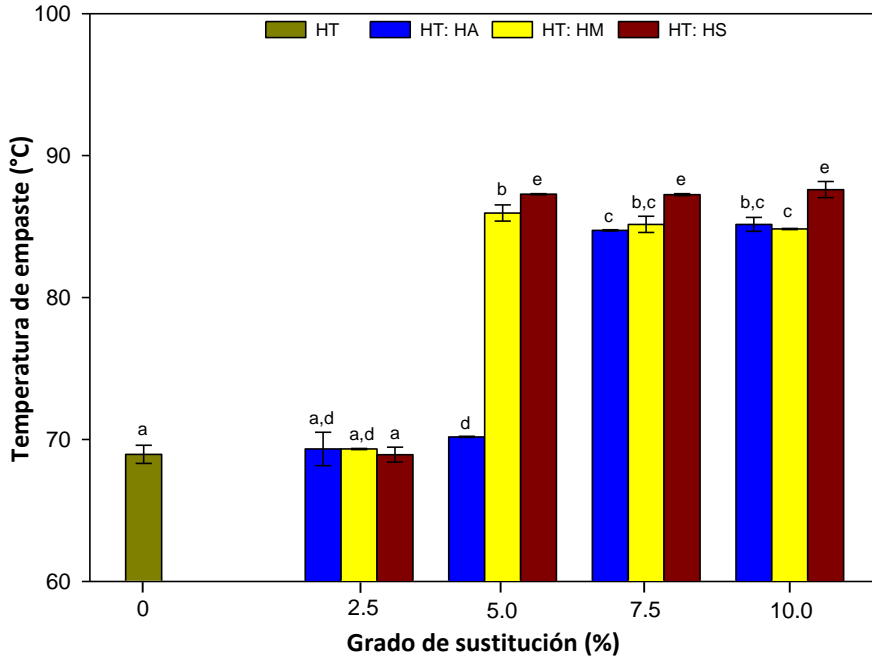


Figura II.5. Temperatura de empaste de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).

Cuando el almidón se calienta en un ambiente acuoso sufre una serie de cambios. El gránulo de almidón absorbe agua y se hincha; la estructura cristalina interna se derrite (gelatinización); el propio gránulo se rompe y se forma un gel continuo. Así mientras que el estado inicial y final de este se pueden definir fácilmente, los estados intermedios no se describen con tanta facilidad. El hinchamiento del gránulo de almidón comienza tan pronto como el gránulo empieza a hidratarse, es decir, tan pronto como el almidón es añadido al agua, y la hidratación es un precursor esencial para la gelatinización. Sin embargo, en la mayoría de los almidones, la gelatinización completa es un requisito previo esencial para que el cocimiento (empaste) se observe (Batey, 2009).

Otro de los parámetros analizados fue la viscosidad pico (V_p), que es la viscosidad máxima de la muestra durante el calentamiento. La Figura II.6 muestra la V_p de las mezclas de HT sustituida con HA, HM o HS. Se observaron diferencias significativas. Al incorporar las harinas de sustitución en un nivel del 2.5% se produjo un descenso en los valores de este parámetro, los cuales fueron aumentando hasta alcanzar los valores máximos para un nivel de sustitución del 10% [HA (2266.5 ± 12.02), HM (2260 ± 14.14) o HS (2306.5 ± 19.09)], siendo el valor obtenido para la mezcla al 10% con HS incluso mayores a los obtenidos solo por HT (2245 ± 15.56). La reducción en el hinchamiento de los gránulos de almidón es indicativo de las bajas viscosidades pico y la disminución en la ruptura de los gránulos de almidón (Ktenioudaki et al., 2013).

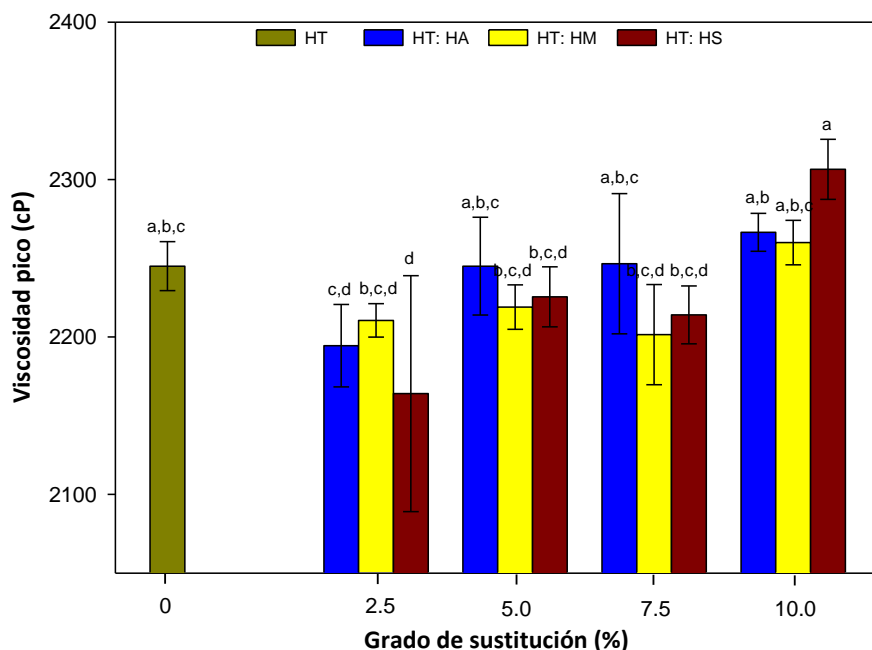


Figura II.6. Viscosidad pico de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).

La temperatura de la V_p no necesariamente se relaciona con el valor de la viscosidad inicial. La viscosidad inicial real está relacionada con una

combinación del hinchamiento de los gránulos de almidón y la velocidad de rompimiento de los gránulos, mientras que la temperatura pico está relacionada con la velocidad a la cual los gránulos alcanzan su máxima hinchamiento. Los gránulos que tienen una alta capacidad de hinchamiento también tienden a tener una alta viscosidad. La velocidad de calentamiento también tiene un efecto importante sobre la viscosidad pico. El cocimiento (empaste) es un fenómeno relacionado con la temperatura, y el calentamiento de una mezcla más rápido provoca un rápido hinchamiento de los gránulos, lo que permite a los gránulos que alcancen su máxima hinchazón y la contribución a la viscosidad antes de que su rompimiento comience a disminuir la viscosidad (Batey, 2009).

Otro parámetro muy importante que se analizó fue la viscosidad final (V_f). La V_f es la formada por el gel durante el enfriamiento sucediendo una re-asociación entre moléculas de almidón, principalmente amilosa que resulta en la formación de un gel que incrementa dicha viscosidad (Lei et al., 2008).

La Figura II.7 muestra los valores de V_f de las mezclas de HT sustituida con HA, HM o HS. El comportamiento observado para los valores obtenidos es muy similar al observado anteriormente, pero más acentuado. Al realizar una sustitución del 2.5% se produjo un descenso en los valores de este parámetro, los cuales fueron incrementando con el tanto por cien de sustitución. Los valores más altos fueron encontrados cuando HT fue sustituida con HS al 5% (2742.5 ± 6.36), 7.5% (2833.5 ± 6.36) o 10% (3029.5 ± 47.38), sin embargo, incrementos importantes fueron alcanzados cuando se utilizó en la sustitución HA (2715 ± 14.14) o HM (2728 ± 25.46) al 10%, todos ellos valores por encima de los registrados por HT (2660 ± 5.66). Estudios realizados por Ktenioudaki et al., (2013), al trabajar en la sustitución de harina de trigo por subproductos alimenticios obtuvo resultados de viscosidad final en harina de trigo (3413 cP), mayores al obtenido en nuestro estudio. Otros estudios realizados por Zaidul et al., (2007), observaron también incrementos significativos en la viscosidad final cuando aumentaron el nivel de sustitución de harina de trigo con almidón en porcentajes de 10 a 50%. Conclusiones atribuidas a fuertes interacciones entre almidón y proteína y al incremento en enlaces disulfuro que pueden ser responsables

de altos valores de viscosidad final son a las que llegaron Tadeu-Paraginski et al., (2014) para este parámetro de viscosidad.

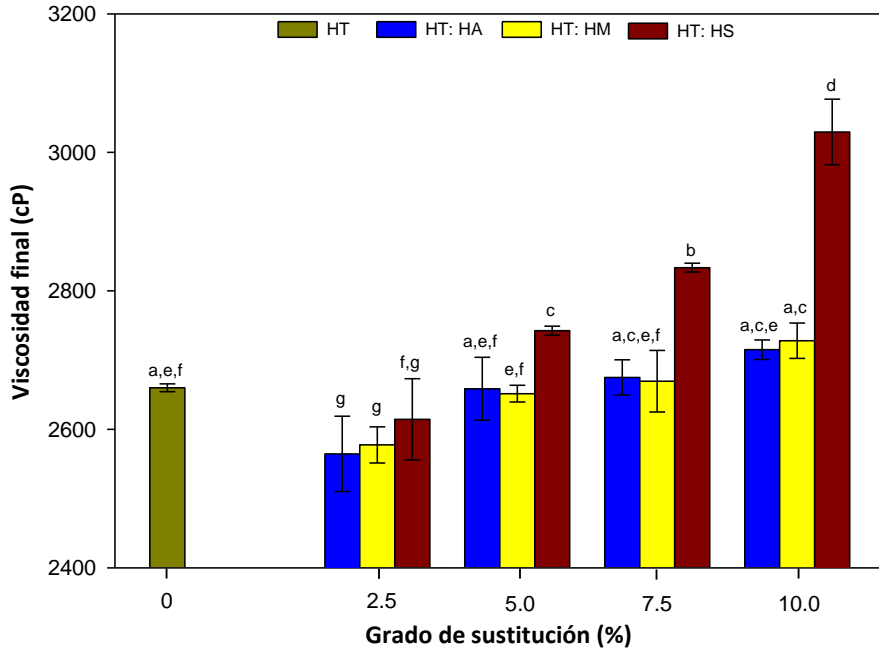


Figura II.7. Viscosidad final de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).

La Tabla II.3 muestra los valores obtenidos para los restantes parámetros obtenidos a partir del análisis de RVA, como son la viscosidad mínima (V_m , cP) que es la viscosidad mínima después de la viscosidad pico, la viscosidad de ruptura (V_{rup} , cP) que corresponde a la caída de viscosidad que surge de la diferencia de la viscosidad pico y la viscosidad mínima y finalmente la viscosidad de restitución (V_r , cP) que es resultado de la viscosidad final menos la viscosidad mínima.

Al analizar los resultados de V_m se apreció como HT (1421 ± 4.95) no mostró diferencias significativas cuando fue sustituida con HA en los diferentes porcentajes utilizados en la investigación. Este mismo comportamiento fue observado cuando se utilizó HM en la sustitución, excepto cuando se sustituyó al 7.5% (1334 ± 35.36), que fue el único nivel de sustitución que

mostró diferencias con respecto a HT. Finalmente, al ser utilizada HS en la sustitución, se apreciaron diferencias significativas con respecto a HT al utilizar niveles de sustitución de 2.5% (1308 ± 48.08) o 7.5% (1339 ± 12.73). Los resultados obtenidos mostraron también una relación directa importante entre la Vp y la Vm, en las cuales se observó que al disminuir la Vp también disminuyó la Vm. Estudios realizados por Blazek y Copeland (2008), con propiedades de viscosidad en harina de trigo e hinchamiento de almidones, obtuvieron valores promedio de 1510.8 cP para viscosidad mínima, valores bastante cercanos a los obtenidos en nuestro estudio.

Tabla II.3. Resultados de viscosidad mínima, viscosidad de ruptura y viscosidad de restitución de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.

Harina	Viscosidad mínima (cP)	Viscosidad de ruptura (cP)	Viscosidad de restitución (cP)
Trigo	1421.5 ± 4.94 abcd	823 ± 10.61 ad	1238.5 ± 10.61 a
HT: HA 2.5%	1396.5 ± 37.48 bcde	798 ± 11.31 d	1168 ± 16.97 h
HT: HA 5%	1426 ± 9.90 abc	819 ± 41.01 ad	1232.5 ± 55.36 a
HT: HA 7.5%	1429 ± 45.25 ab	817.5 ± 0.71 ad	1246 ± 19.8 af
HT: HA 10%	1476 ± 36.77 a	790.5 ± 24.75 d	1239 ± 22.63 a
HT: HM 2.5%	1363.5 ± 14.85 defg	847 ± 4.24 ab	1214 ± 11.31 ah
HT: HM 5%	1374.5 ± 7.78 bcdef	844.5 ± 21.92 ab	1277 ± 19.8 aef
HT: HM 7.5%	1334 ± 35.36 fg	867.5 ± 3.53 bc	1335 ± 9.19 cde
HT: HM 10%	1369.5 ± 24.75 cdef	890.5 ± 10.61 c	1358.5 ± 50.2 cd
HT: HS 2.5%	1308 ± 48.08 g	856 ± 26.87 ab	1306.5 ± 10.61 def
HT: HS 5%	1369 ± 7.07 cdef	856.5 ± 26.16 ab	1373.5 ± 13.44 c
HT: HS 7.5%	1339 ± 12.73 efg	875 ± 5.66 bc	1494.5 ± 19.09 b
HT: HS 10%	1422 ± 7.07 abcd	884.5 ± 26.16 c	1607.5 ± 54.45 g

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. cP, Centipoise. El % observado en la tabla indica el grado de sustitución de HT. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

La V rup en HT (823 ± 10.61) no mostró diferencias significativas con respecto a las sustituciones llevadas a cabo con HA en los 4 diferentes porcentajes, sin embargo, cuando se llevaron a cabo con la HM, si se observaron diferencias significativas al sustituirla con HM al 7.5% (867.5 ± 3.53) o 10% (890.5 ± 10.61). En lo que respecta a la sustitución realizada con HS, se observaron diferencias significativas también cuando se utilizó al 7.5% (875 ± 26.16) o 10% (884.5 ± 26.16). Los mismos porcentajes observados cuando se empleó

HM en la sustitución. Estudios realizados por Blazek y Copeland (2008) observaron valores promedio de viscosidad de ruptura de 904.8 cP, semejantes a los obtenidos en nuestro estudio. Por otro lado Ktenioudaki et al., (2013), obtuvo valores de 1289 cP para este mismo parámetro, un valor bastante diferente al obtenido en el estudio. La viscosidad de ruptura también es considerada como la medida del grado de desintegración de los gránulos o estabilidad de la pasta (Dengate, 1984; Newport Scientific, 1995).

En lo que respecta a la Vr, al utilizar HA en la sustitución de HT (1238.5 ± 10.61) solo mostró diferencias significativas cuando se empleó al 2.5% (1168 ± 16.97), mientras que a 5, 7.5 o 10% no se observaron diferencias. En cuanto a la utilización de HM en la sustitución, se observaron diferencias significativas cuando se utilizó al 7.5 (1335 ± 9.19) o 10% (1358.5 ± 50.2). Se observaron también incrementos en la Vr al incrementar el nivel de sustitución. Al utilizar HS, todas las sustituciones hechas con este cereal mostraron diferencias significativas con respecto a HT. Ktenioudaki et al., (2013) observaron valores de 1289 cP muy cercano a los obtenidos en nuestro estudio. Cuando la sustitución fue realizada por HS se evidenciaron incrementos de viscosidad los cuales fueron más notorios al emplear HS al 7.5 (1494.5 ± 19.09) o 10% (1607.5 ± 54.45) en la sustitución. Estudios realizados por Zaidul et al., (2003) reportaron que la viscosidad de restitución refleja la tendencia de retrogradación del almidón, la cual inhibe el incremento de la viscosidad mínima sobre el enfriamiento. Zaidul et al., (2007) encontraron también que al sustituir HT con almidón de papa obtenía cambios importantes en la viscosidad pico y en la viscosidad de restitución ocasionados por el contenido de proteínas y lípidos de la HT.

II.3.2 Análisis de las masas

II.3.2.1 Fuerza, extensibilidad y trabajo de deformación de la masa

El análisis de las propiedades físicas de la masa comprendió el análisis de la fuerza (N), extensibilidad (mm) y trabajo de deformación (Nmm). El reemplazo de la HT con HA, HM o HS afectó las mediciones anteriores

observándose diferencias significativas entre ellos. La Tabla II.4 nos muestra los resultados obtenidos en esta prueba. Al observar este efecto y comparar los resultados obtenidos al emplear HA en la sustitución con respecto a HT (0.69 ± 0.01) se observaron diferencias significativas en todos los niveles de sustitución. La tendencia de los resultados fue de disminuir al incrementar la sustitución, siendo esto más evidente al utilizar 7.5 (0.5 ± 0.01) o 10% (0.45 ± 0.01) de HA. Al realizar la sustitución con HM, los efectos en la disminución fueron más notables que el resto de los cereales. Los resultados obtenidos presentaron un rango de 0.27 a 0.30 N. Por último, al utilizar HS en la sustitución también se observaron diferencias con respecto a HT. Los valores obtenidos al utilizar este cereal fueron los más cercanos a HT siendo para una sustitución del 10% el más cercano (0.61 ± 0.05).

En lo referente a extensibilidad también se observaron diferencias significativas sin apreciarse un comportamiento regular. Los valores más altos fueron obtenidos para la HT (78.15 ± 3.76), además de los alcanzados por las mezclas de HT: HA 5% (78.7 ± 1.73), HT: HM 2.5% (73.42 ± 12.9) o HT: HS 5% (78.1 ± 8.49). En lo que respecta al trabajo de deformación, al igual que para la extensibilidad, no se observó un comportamiento bien definido entre las muestras. Sin embargo, algo muy evidente, fue el valor más alto observado en la HT (34.23 ± 0.7) con respecto al resto. Los valores más bajos fueron obtenidos cuando la HT fue sustituida con HM en los 4 niveles diferentes de sustitución, semejante a lo observado en la medición de fuerza.

Las propiedades reológicas de las masas son críticas en la manufactura de alimentos (Barak et al., 2013). La masa exhibe un comportamiento visco elástico, combinando las propiedades de un fluido viscoso y un sólido elástico. La combinación de harina, agua y levadura juega un papel muy importante que define la estructura y propiedades reológicas de la masa (Upadhyay et al., 2012).

Tabla II.4. Propiedades físicas de las masas obtenidas de HT y las mezclas de HT sustituidas con HA, HM o HS.

Harina	Fuerza (N)	Extensibilidad (mm)	TD (N mm)
Trigo	0.69 ± 0.01 a	78.15 ± 3.76 a	34.23 ± 0.7 a
HT: HA 2.5%	0.6 ± 0.01 b	72.1 ± 2.33 abc	26.4 ± 2.84 bcd
HT: HA 5%	0.52 ± 0.03 c	78.7 ± 1.73 a	26.67 ± 0.33 bcd
HT: HA 7.5%	0.5 ± 0.01 c	71.12 ± 0.05 bc	25.28 ± 2.11 cd
HT: HA 10%	0.45 ± 0.01 d	66.63 ± 3.66 bcd	21.6 ± 2.16 e
HT: HM 2.5%	0.3 ± 0.03 e	73.42 ± 12.9 ab	14.16 ± 2.11 f
HT: HM 5%	0.29 ± 0.02 e	63.8 ± 5.29 d	12.44 ± 1.65 f
HT: HM 7.5%	0.27 ± 0.01 e	65.05 ± 4.79 d	11.82 ± 1.5 f
HT: HM 10%	0.27 ± 0.02 e	66.17 ± 4.43 cd	13.03 ± 1.86 f
HT: HS 2.5%	0.51 ± 0.04 c	68.5 ± 0.06 bcd	25.21 ± 1.8 cd
HT: HS 5%	0.5 ± 0.04 c	78.1 ± 8.49 a	23.69 ± 4.55 d
HT: HS 7.5%	0.59 ± 0.06 b	77.7 ± 5.95 a	28.81 ± 4.12 b
HT: HS 10%	0.61 ± 0.05 b	66.06 ± 5.25 cd	27.55 ± 0.37 bc

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. N, Newton; mm, milímetro; TD, Trabajo de deformación. El % observado en la tabla indica el grado de sustitución de HT. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

Estudios realizados por Ktenioudaki et al., (2013) observaron cambios en las pruebas reológicas de las masas durante la adición de sub productos, ocasionados posiblemente por la adición de fibra la cual interactúa con el desarrollo del gluten causando cambios en sus propiedades reológicas. Este comportamiento ha sido reportado por Rieder et al., (2012), quien trabajó sobre la calidad reológica de la masas al ser sustituida la HT con harina de cebada y harina de avena. Estos autores observaron también como la F y Ext disminuyeron por dilución del gluten de trigo cuando el contenido de fibra aumentó, lo que puede generar un rompimiento de la red de gluten durante la formación de la mezcla.

II.3.2.2 Capacidad fermentativa

Con la finalidad de evaluar la capacidad fermentativa de la masa se procedió a realizar la medición del volumen de la masa después de una hora de fermentación. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura II.8. Como puede observarse, la sustitución de HT por HA no generó variaciones en la fermentación obteniéndose para todos los niveles de sustitución valores similares a los de HT (136.32 ± 4.62). Cuando la sustitución fue realizada con HM, se produjo un descenso de la capacidad fermentativa. A mayor nivel de sustitución se produjo una menor subida de la masa. En el caso de la sustitución con HS, al igual que con HM, también se produjo un descenso de la capacidad fermentativa, siendo inicialmente (sustituciones al 2.5 y 5%) más acusada que en el caso de HS, pero igual o incluso ligeramente superior para las dos últimas (7.5 y 10%).

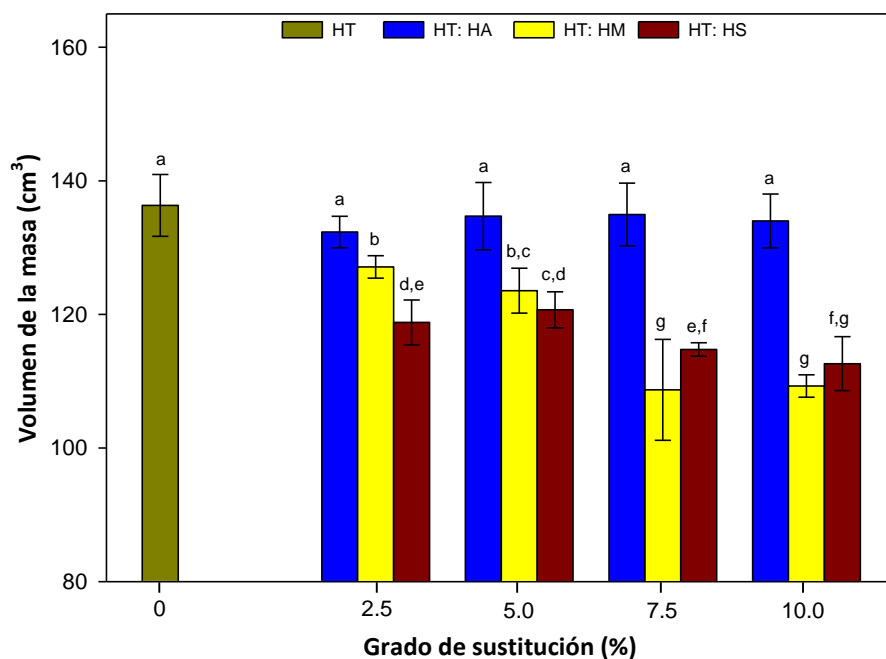


Figura II.8. Volumen de la masa (cm^3) de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS) a una hora de fermentación.

La formación de la masa es uno de los procesos más importantes en la industria de la panificación que puede ser afectada por el contenido de proteína y su calidad, así como por la formación de una matriz proteína-almidón como una membrana celular capaz de estabilizar células de gas en expansión (Bloksma, 1990; Hosney, 1992). El amasado es crucial para el proceso de panificación ya que crea las burbujas iniciales que proporcionan los puntos de nucleación que serán inflados con CO₂ producido durante el proceso de fermentación (Chiotellis y Campbell, 2003). La estructura de una masa fermentada es una dispersión discreta de burbujas en una matriz proteica continua (embebida con gránulos de almidón) en la cual la viscoelasticidad permite que las burbujas se expandan y retengan gas (MacRitchie, 1976; Bloksma, 1990). Diferentes estudios han mostrado que el gas generado en la fermentación no es retenido cuando la masa se encuentra por debajo de contenidos de humedad cercanos al 35% del total del peso de la masa, pero la retención de gas mejora cuando el contenido de agua ésta cercano o por encima del 44% (MacRitchie, 1976).

II.3.3 Análisis en pan

II.3.3.1 Pérdida de peso durante el horneado

Después de elaborar el pan y enfriarlo se pesó (g). La Figura II.9 nos muestra el % de pérdida de peso de la masa durante el horneado. El valor obtenido de la HT (-13.34 ± 1.39) presentó diferencias importantes con respecto a los obtenidos en las diferentes mezclas de harinas. Se observaron diferencias hasta de 2.84% en algunos casos, más específico cuando la HT fue sustituida con HS al 10% (-16.18 ± 0.45). Dentro de los porcentajes obtenidos, los más cercanos a la HT fueron los registrados por la mezcla de HT: HM en los niveles de sustitución de 2.5% (-14.46 ± 1.11) o 5% (-14.82 ± 1.01). El resto de las mezclas analizadas estuvieron por encima del 15% en pérdida en peso durante el horneado.

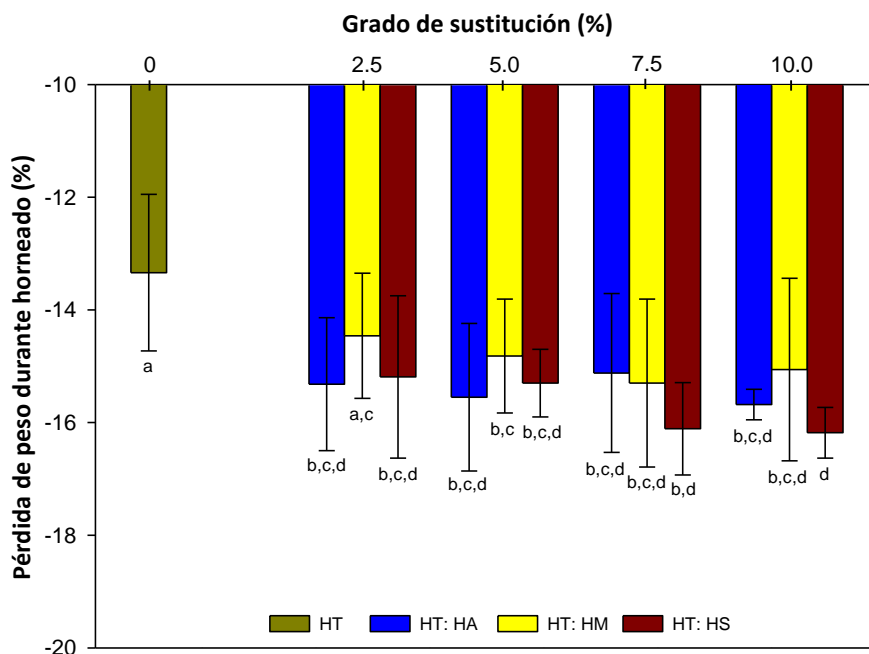


Figura II.9. Pérdida de peso durante el horneado de la masa obtenida de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).

II.3.3.2 Análisis de perfil de textura (TPA, Texture Profile Analysis)

Los resultados del análisis del perfil de textura se muestran en la Tabla II.5 y II.6. Este análisis, es una técnica que trata de utilizar bases comunes para los métodos subjetivos y objetivos empleados para estimar la calidad asociada a la palatabilidad/masticabilidad (Hernández y Duran, 2012). Los primeros resultados mostrados son dureza (N), elasticidad y cohesividad. Se puede apreciar que se evidenciaron diferencias significativas al realizar el análisis de ellas. En relación a dureza, definida como la fuerza necesaria para alcanzar la deformación máxima preestablecida, se logró apreciar como la HT sustituida con sorgo en niveles de 5 (9.39 ± 1.02), 7.5 (9.66 ± 1.44) y 10% (10.51 ± 1.56) mostraron valores similares al obtenido por los panes elaborados con la harina HT (9.32 ± 1.02). El resto de las sustituciones presentaron valores

inferiores a los de HT. En cuanto a elasticidad, altura registrada por el alimento cuando inicia la segunda compresión respecto a la que tenía inicialmente, no se vio afectada por el nivel de sustitución y el cereal empleado para ello, dado que no se observaron diferencias significativas cuando fueron analizados los resultados. En lo que respecta a cohesividad, relación de áreas originadas en los dos ciclos de compresión, excluyendo la zona de descompresión de cada ciclo, sí se lograron establecer diferencias significativas. Los resultados obtenidos para este parámetro están agrupados dentro de un rango de 0.78 a 0.86. Al observar los resultados cuando la HT (0.81 ± 0.01) fue sustituida con HA, se logró apreciar diferencias significativas solamente en la sustitución del 10% (0.83 ± 0.01), mientras que al ser utilizada HM las diferencias fueron observadas cuando la HT fue sustituida al 5 y 7.5% (0.84 ± 0.01) o 10% (0.86 ± 0.05). Cuando se utilizó HS en la sustitución, las diferencias significativas fueron observadas al emplear el 5 (0.79 ± 0.01) o 10% (0.78 ± 0.01) con respecto al pan obtenido solamente de HT.

Tabla II.5. Dureza, elasticidad y cohesividad de los panes obtenidos de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.

<i>Pan</i>	<i>Dureza (N)</i>	<i>Elasticidad</i>	<i>Cohesividad</i>
HT	9.32 ± 1.02 a	0.98 ± 0.03 a	0.81 ± 0.01 aef
HT: HA 2.5%	6.38 ± 1.04 cd	0.94 ± 0.07 a	0.82 ± 0.01 ade
HT: HA 5%	6.71 ± 0.78 cd	0.98 ± 0.01 a	0.82 ± 0.01 abc
HT: HA 7.5%	6.13 ± 0.94 cde	0.97 ± 0.08 a	0.82 ± 0.01 abc
HT: HA 10%	4.82 ± 1.04 ef	0.92 ± 0.11 a	0.83 ± 0.01 bc
HT: HM 2.5%	7.28 ± 0.8 bc	0.96 ± 0.04 a	0.81 ± 0.01 aef
HT: HM 5%	5.2 ± 1.11 ef	0.95 ± 0.05 a	0.84 ± 0.01 b
HT: HM 7.5%	4.78 ± 1.3 f	0.94 ± 0.06 a	0.84 ± 0.01 b
HT: HM 10%	5.64 ± 0.83 def	0.95 ± 0.05 a	0.86 ± 0.05 d
HT: HS 2.5%	8.2 ± 1.14 b	0.98 ± 0.02 a	0.80 ± 0.01 fgh
HT: HS 5%	9.39 ± 1.02 a	0.96 ± 0.06 a	0.79 ± 0.01 gh
HT: HS 7.5%	9.66 ± 1.44 a	0.98 ± 0.02 a	0.80 ± 0.01 fgh
HT: HS 10%	10.51 ± 1.56 a	0.97 ± 0.03 a	0.78 ± 0.01 h

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. N, Newton. El % observado en la tabla indica el grado de sustitución de HT. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

Otros de los parámetros analizados fueron gomosidad, masticabilidad y resiliencia. La gomosidad, definida como el producto de dureza por cohesividad, al igual que la dureza, cuando HT (7.56 ± 0.79) fue sustituida con HS al 5% (7.47 ± 0.76), 7.5% (7.76 ± 1.11) o 10% (8.29 ± 1.10) no se evidenciaron diferencias significativas para este parámetro. Las sustituciones tanto con avena (HA) como con maíz (HM) mostraron valores inferiores a los de HT, siendo las sustituciones que presentaron menores valores aquellas en las que HT fue sustituida con HA al 10% (4.03 ± 0.85) o HM al 7.5% (4.01 ± 1.03). En relación a masticabilidad, definida como el producto de dureza por cohesividad por elasticidad, mostró un comportamiento muy semejante al de dureza y gomosidad, siendo los valores para las sustituciones con HS al 5, 7.5 y 10%, iguales estadísticamente a los de HT (7.44 ± 0.83), e inferiores estadísticamente a los obtenidos por el resto de sustituciones. Finalmente,

resiliencia fue el último de los parámetros evaluado. Al analizar el valor obtenido del pan elaborado con HT (0.442 ± 0.01) con respecto al de las sustituciones con los diferentes cereales, se logró observar diferencias significativas al utilizar HA en sus diferentes niveles de sustitución, sucediendo este mismo comportamiento cuando se utilizó HM, excepto al nivel de sustitución del 2.5% (0.446 ± 0.01). Con respecto a las sustituciones donde se utilizó HS, no se observaron diferencias significativas, los valores obtenidos estuvieron por debajo (0.436 a 0.441) del alcanzado por HT, comportamiento opuesto al observado cuando se empleo HA en las sustituciones.

Tabla II.6. Gomosidad, masticabilidad y resiliencia de los panes obtenidos de HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.

<i>Pan</i>	<i>Gomosidad</i>	<i>Masticabilidad</i>	<i>Resiliencia</i>
HT	7.56 ± 0.79 a	7.44 ± 0.83 a	0.442 ± 0.01 adef
HT: HA 2.5%	5.22 ± 0.8 cd	4.95 ± 0.97 def	0.451 ± 0.01 bc
HT: HA 5%	5.54 ± 0.63 cd	5.45 ± 0.61 de	0.459 ± 0.01 c
HT: HA 7.5%	5.05 ± 0.72 cde	4.96 ± 1.02 def	0.452 ± 0.01 bc
HT: HA 10%	4.03 ± 0.85 ef	3.74 ± 0.96 g	0.455 ± 0.01 bc
HT: HM 2.5%	5.92 ± 0.58 bc	5.73 ± 0.68 cd	0.446 ± 0.01 ade
HT: HM 5%	4.35 ± 0.89 ef	4.19 ± 0.97 fg	0.452 ± 0.01 bc
HT: HM 7.5%	4.01 ± 1.03 f	3.81 ± 1.11 g	0.459 ± 0.01 c
HT: HM 10%	4.82 ± 0.65 de	4.62 ± 0.76 efg	0.455 ± 0.01 bc
HT: HS 2.5%	6.58 ± 0.89 b	6.49 ± 0.94 bc	0.439 ± 0.01 ef
HT: HS 5%	7.47 ± 0.76 a	7.21 ± 0.95 ab	0.436 ± 0.01 f
HT: HS 7.5%	7.76 ± 1.11 a	7.61 ± 1.04 a	0.441 ± 0.01 def
HT: HS 10%	8.29 ± 1.1 a	8.08 ± 1.17 a	0.432 ± 0.01 f

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. El % observado en la tabla indica el grado de sustitución de HT. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

Estudios realizados por López y Goldner (2015), sobre la influencia del almacenamiento en pan elaborado con harina de trigo y aislado de proteína

de altramuz, utilizaron como control el pan elaborado con harina de trigo observaron resultados de cohesividad de 0.80, muy semejante al encontrado en nuestras muestras, además de elasticidad de 0.91, gomosidad de 6.2 y masticabilidad de 5.64. Estudios realizados por Verdú et al., (2015) también utilizando como control HT para elaborar pan, obtuvieron valores muy cercanos a los obtenidos para el estudio en cohesividad 0.9 y elasticidad 1.0, sin embargo no para dureza 2.92, gomosidad 2.6 y masticabilidad 2.6 que fueron valores algo alejados a los obtenidos en nuestro estudio.

La blandura o dureza de la miga es uno de los atributos de textura que más ha llamado la atención, por la percepción de frescura del producto, en este caso pan, que nos brinda una estimación de la calidad del mismo. La textura y la palatabilidad de los productos de panadería son atributos muy importantes que difieren de un producto a otro. En el caso de la textura de la miga del pan, las propiedades mecánicas como firmeza y elasticidad son de las que más interesan y muy frecuentemente se trata de ligar estas parámetros con las características asociadas a la palatabilidad/masticabilidad mediante la adaptación de los más fundamentales métodos físicos de análisis (Hernández y Duran, 2012).

II.3.3.3 Actividad de agua (a_w)

La Figura II.10 muestra los resultados de actividad de agua de los panes con la HT así como para la sustituida parcialmente con HA, HM o HS. Para esta medición no se observó un comportamiento muy regular de las muestras, sin embargo, si se observaron diferencias significativas. En todas las muestras se obtuvieron valores escasamente mayores a la HT (0.9552 ± 0.0026). Los valores más altos fueron obtenidos cuando la HT fue sustituida con HA al 5% (0.9607 ± 0.002) o 7.5% (0.9608 ± 0.008) sin observarse diferencias significativas entre ellos, pero si con respecto al pan elaborado con HT. Al analizar las sustituciones realizadas con HM observamos que estas no mostraron diferencias significativas con respecto al valor de actividad de agua presentado por HT. Este mismo comportamiento se observó cuando se utilizó HS en los niveles de sustitución de 2.5, 5 o 7.5%, no así cuando el nivel

de sustitución alcanzó el 10% (0.9597 ± 0.002) donde sí se observaron diferencias significativas con respecto a HT.

Estudios realizados por Giannone et al., (2016), al utilizar harina de trigo como control para elaborar pan, observó valores de actividad de agua de 0.947, menor al parámetro obtenido en nuestro pan.

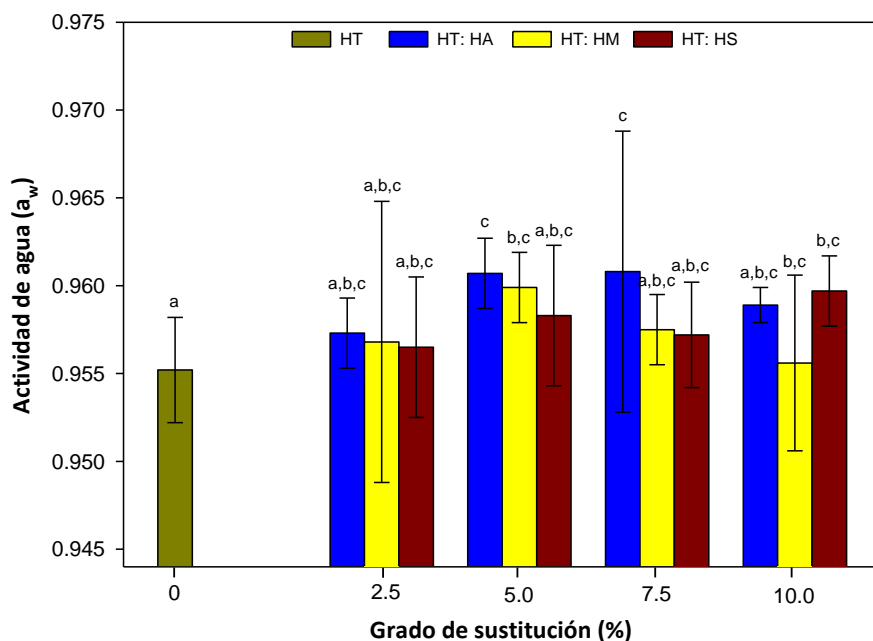


Figura II.10. Actividad de agua de panes obtenidos de harina de trigo (HT) y las mezclas de HT con harina de avena (HA), maíz (HM) o sorgo (HS).

La actividad de agua se refiere al estado de energía del agua en el alimento, lo que determina si se producirán reacciones químicas y/o crecerán microorganismos. Los componentes principales de los alimentos como azúcar, sal, proteínas y almidón ligan el agua haciéndola menos disponible. Los alimentos con menor actividad de agua son menos propensos a descomponerse a causas de microorganismos y tienen menos cambios químicos indeseables durante su almacenamiento. En pan podemos encontrar valores que van de 0.90 a 0.95 como normales, sin embargo, en nuestro estudio todos los panes analizados registraron valores mayores a

0.95, más evidente cuando se utilizó HA en la sustitución de HT, posiblemente por el alto porcentaje de β -glucanos (2.3 a 8.5 g/100 g) que posee este cereal que incrementando la viscosidad de la masa como consecuencia de una mayor retención de agua.

II.3.3.4 Determinación de color de las migas

La determinación de color del pan se realizó sobre la miga, después de pasar por un proceso de secado y molienda. La Tabla II.7 muestra los resultados de color de la miga obtenida del pan elaborado con HT y HT sustituida con HA, HM o HS. El valor de L^* disminuyó en todas las migas con respecto a los valores observados en las mezclas de harinas antes de ser sometidas al proceso de panificación (Tabla II.2). Al comparar los valores entre los panes, tanto la sustitución con HA pero sobre todo con HS, se observó un decrecimiento de los valores de L^* con respecto al obtenido para HT (91.76 ± 0.18), siendo más acusado este descenso al incrementar el grado de sustitución, alcanzando para el nivel de sustitución del 10% un valor de 89.79 ± 0.15 y 88.18 ± 0.15 respectivamente. En cambio la sustitución con HM no generó diferencias con respecto al valor obtenido solo con HT salvo cuando el nivel de sustitución fue del 10% cuyo valor fue ligeramente inferior (90.49 ± 0.20). En relación al valor de a^* , este disminuyó también al ser comparado con el de las mezclas de harina antes de panificar (Tabla II.2). Los valores más altos fueron alcanzados cuando la HT fue sustituida por HS en sus 4 diferentes grados de sustitución, siendo esto más evidente al sustituir el 10% (4.89 ± 0.12). La sustitución que más afectó el valor de a^* fue cuando se utilizó HM en sus diferentes %, registrándose los valores más bajos que el resto de las harinas utilizadas. Estos valores fueron obtenidos dentro de un rango de 3.95 a 4.12. Al realizar la sustitución con HA solamente en porcentajes de 7.5 (4.29 ± 0.03) o 10% (4.32 ± 0.02) se lograron apreciar diferencias significativas. En lo que respecta a la medición de b^* , esta incrementó con el tratamiento de horneado, contrario a lo observado en la medición de L^* y a^* . Los valores obtenidos más altos fueron cuando la HT fue sustituida por HM al 7.5% (8.47 ± 0.33) o al 10% (8.81 ± 0.32), siendo los

efectos más notorios a la baja cuando HT fue sustituida por HS en los 4 diferentes porcentajes, no observándose diferencias significativas con HT para las sustituciones del 5 (6.33 ± 0.33), 7.5 (6.26 ± 0.49) o 10% (6.02 ± 0.27).

El valor de C* también fue afectado en este proceso de horneado generando incrementos importantes con respecto a las mezclas de harinas. La tendencia de C* fue de incrementar al aumentar el grado de sustitución para los tres diferentes cereales implicados en el estudio. Los incrementos más importantes fueron observados cuando se utilizó HM en la sustitución, siendo esto más evidente al 7.5 (9.35 ± 0.27) o 10% (9.66 ± 0.28). Todos los valores obtenidos en este parámetro mostraron diferencias significativas con respecto al obtenido por HT (7.38 ± 0.11). Con respecto al valor H* también incrementó de manera importante al observado en las mezclas de harinas. La tendencia observada en esta medición fue muy semejante al valor de b*, incrementos al usar HA o HM en los diferentes grados de sustitución y una notoria disminución afectada por el % de sustitución al utilizar HS.

Tabla II.7. Resultados de color de la miga del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.

<i>Miga</i>	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>	<i>C*</i>	<i>H*</i>
<i>HT</i>	91.76 ± 0.18 a	4.20 ± 0.04 a	6.06 ± 0.16 a	7.38 ± 0.11 a	55.27 ± 0.95 a
<i>HT: HA 2.5%</i>	90.66 ± 0.08 c	4.25 ± 0.04 ae	6.78 ± 0.15 de	8.02 ± 0.30 ef	57.81 ± 1.08 d
<i>HT: HA 5%</i>	90.64 ± 0.18 cd	4.25 ± 0.03 ae	6.86 ± 0.36 d	8.12 ± 0.10 de	57.91 ± 0.50 d
<i>HT: HA 7.5%</i>	90.33 ± 0.11 e	4.29 ± 0.03 de	6.92 ± 0.18 cd	8.14 ± 0.11 cde	58.38 ± 0.81 cd
<i>HT: HA 10%</i>	89.79 ± 0.15 f	4.32 ± 0.02 cd	7.23 ± 0.20 bc	8.39 ± 0.19 c	59.53 ± 0.55 c
<i>HT: HM 2.5%</i>	91.82 ± 0.14 a	4.12 ± 0.04 g	6.61 ± 0.22 def	7.79 ± 0.17 fg	58.02 ± 1.05 d
<i>HT: HM 5%</i>	91.65 ± 0.15 a	3.96 ± 0.03 h	7.37 ± 0.15 b	8.37 ± 0.13 cd	61.72 ± 0.46 b
<i>HT: HM 7.5%</i>	91.61 ± 0.19 a	3.96 ± 0.04 h	8.47 ± 0.33 g	9.35 ± 0.27 b	64.98 ± 1.25 e
<i>HT: HM 10%</i>	90.49 ± 0.20 b	3.95 ± 0.06 h	8.81 ± 0.32 g	9.66 ± 0.28 h	65.72 ± 0.96 e
<i>HT: HS 2.5%</i>	90.39 ± 0.22 de	4.38 ± 0.03 c	6.43 ± 0.13 ef	7.66 ± 0.26 g	55.26 ± 1.53 a
<i>HT: HS 5%</i>	89.48 ± 0.30 g	4.61 ± 0.02 b	6.33 ± 0.33 af	7.71 ± 0.25 g	54.38 ± 0.48 a
<i>HT: HS 7.5%</i>	89.20 ± 0.43 h	4.66 ± 0.05 b	6.26 ± 0.49 af	7.81 ± 0.16 fg	52.26 ± 1.23 f
<i>HT: HS 10%</i>	88.18 ± 0.15 i	4.89 ± 0.12 f	6.02 ± 0.27 a	7.92 ± 0.12 efg	50.87 ± 1.03 g

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo; C*, croma; H*, valor Hue. El % observado en la tabla indica el grado de sustitución de HT. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

II.3.3.5 Análisis sensorial

En la Tabla II.8 se muestran los resultados de las catas para cada uno de los panes testados y parámetros evaluados. En color verde se muestran aquellos panes cuyo valor no fue estadísticamente diferente del obtenido para los panes elaborados solo con HT. En azul se muestran aquellos panes con harina sustituida parcialmente por HA y como se aprecia solo los panes con un 2.5% de sustitución y con un 5% presentaron diferencias para apreciación general y textura al tacto respectivamente, siendo los valores obtenidos menores que los de los panes con HT. En amarillo se muestran las diferencias cuando la harina sustitutoria fue maíz. Como se puede apreciar en la tabla, ningún parámetro y para ningún nivel de sustitución se presentó diferencias significativas con los panes elaborados solo con HT. Finalmente en anaranjado se muestran las diferencias cuando la harina sustitutoria fue procedente de sorgo. Como se aprecia, los panes elaborados con esta harina fueron los que presentaron mayores diferencias con respecto a los elaborados con trigo, siendo en todos los casos los valores obtenidos menores que los de los panes elaborados solo de HT, excepto cuando se realizó la sustitución de HT al 2.5%. Si bien para el parámetro aroma y textura en boca no existieron diferencias, si las hubo para el resto de parámetros, siendo las diferencias más acusadas cuanto mayor fue el grado de sustitución.

Tabla II.8. Resultados de la cata del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA, HM o HS.

Pan	Color	Aroma	Textura tacto	Apariencia	Sabor	Textura boca	Apreciación general
HT	6.48 ± 1.39 a	5.81 ± 1.59 ab	6.12 ± 1.37 a	6.47 ± 1.28 a	5.78 ± 1.59 ab	4.47 ± 1.85 abc	6.08 ± 1.34 a
HT: HA 2.5%	6.23 ± 1.36 a	5.41 ± 1.76 b	5.60 ± 1.61 abc	6.38 ± 1.41 a	5.19 ± 1.62 bc	4.13 ± 1.65 abc	5.43 ± 1.60 bcd
HT: HA 5%	6.12 ± 1.38 ab	5.63 ± 1.48 ab	5.11 ± 1.72 bcd	6.32 ± 1.61 a	5.14 ± 1.50 bc	4.45 ± 1.88 abc	5.62 ± 1.53 abcd
HT: HA 7.5%	6.21 ± 1.48 a	6.20 ± 1.52 ab	5.81 ± 1.67 ab	6.40 ± 1.58 a	5.16 ± 1.45 bc	4.64 ± 2.06 abc	5.65 ± 1.31 abcd
HT: HA 10%	6.30 ± 1.21 a	5.95 ± 1.18 ab	5.76 ± 1.35 ab	6.22 ± 1.75 a	5.31 ± 1.11 abc	3.98 ± 1.59 bc	5.56 ± 1.25 abcd
HT: HM 2.5%	6.38 ± 1.17 a	5.93 ± 1.58 ab	6.26 ± 1.34 a	6.57 ± 1.22 a	5.95 ± 1.03 ab	4.18 ± 1.89 abc	6.11 ± 1.30 abc
HT: HM 5%	6.35 ± 1.17 a	6.29 ± 1.28 ab	5.84 ± 1.17 ab	6.33 ± 1.32 a	5.77 ± 1.41 ab	4.95 ± 1.73 ab	6.01 ± 1.29 abc
HT: HM 7.5%	6.40 ± 1.29 a	5.82 ± 1.50 ab	5.60 ± 1.43 abc	6.38 ± 1.15 a	5.76 ± 1.31 ab	4.79 ± 2.09 abc	5.75 ± 1.18 abc
HT: HM 10%	6.47 ± 1.21 a	6.31 ± 1.26 a	5.81 ± 1.67 ab	6.53 ± 1.20 a	5.76 ± 1.19 ab	5.21 ± 1.75 a	5.81 ± 1.27 abc
HT: HS 2.5%	6.10 ± 1.51 ab	5.48 ± 1.88 ab	5.96 ± 1.12 ab	6.51 ± 1.09 a	6.15 ± 1.52 a	4.64 ± 2.04 abc	6.29 ± 1.27 a
HT: HS 5%	5.28 ± 1.52 bc	5.61 ± 1.50 ab	5.18 ± 1.50 bcd	5.79 ± 1.34 ab	5.19 ± 1.50 bc	4.88 ± 2.06 abc	5.03 ± 1.56 cd
HT: HS 7.5%	5.02 ± 1.42 c	5.85 ± 1.43 ab	4.78 ± 1.04 cd	4.90 ± 1.51 bc	5.26 ± 1.75 abc	3.76 ± 1.92 c	4.88 ± 1.41 d
HT: HS 10%	4.41 ± 1.97 c	5.45 ± 1.64 ab	4.68 ± 1.36 d	4.65 ± 1.82 c	4.76 ± 1.31 c	4.31 ± 1.90 abc	4.82 ± 1.32 d

HT ●, Harina trigo; HA ●, Harina avena; HM ●, Harina maíz; HS ●, Harina sorgo. El % observado en la tabla indica el grado de sustitución de HT. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

Una importante semejanza estadística fue observada por los panes elaborados solo de HT y los obtenidos cuando la harina HT fue sustituida por HA y HM, altos niveles de preferencia en la mayoría de los parámetros analizados por los catadores fueron observados cuando HT fue sustituida por HA, esto mismo sucedió para la sustitución con HM. Resultado del comportamiento anterior de las mezclas mencionadas anteriormente pueden estar relacionados a valores muy semejantes de la capacidad fermentativa (Figura II.8) reflejada como la medición del volumen de la masa a una hora de fermentación. Otro de los parámetros que corrobora esta relación puede ser el análisis de viscosidad observado cuando la HT fue sustituida por HA o HM, (Figura II.2 y II.3) pocos cambios en los diferentes parámetros fueron registrados por ambos cereales, de ahí la posible similitud en los datos generados por los catadores al emplear estos cereales en la sustitución de HT para la elaboración del pan. Las diferencias apreciadas por los consumidores en el color para los panes con HS podría deberse a la coloración más oscura que estos presentaron la cual ya quedó reflejada en los datos de color (Tabla II.7), al obtener los valores más bajos de L*. Otro punto importante para las sustituciones con HS podría ser la pérdida de peso durante el horneado del pan (Figura II.9) al obtenerse un pan más compacto, pudiendo esto influir en los resultados de textura al tacto, apariencia y apreciación general reflejada por la preferencia de los catadores.

CONCLUSIONES

De las harinas estudiadas, la procedente de avena es aquella que presenta mayores similitudes con la de trigo, obteniéndose capacidades fermentativas similares hasta un nivel de sustitución del 10%, si bien los panes elaborados presentan una menor dureza, tal vez por su mayor contenido lipídico, la cual es apreciada por los catadores, siendo el pan elaborado con un nivel de sustitución del 2.5 % diferente en su apreciación global.

La sustitución parcial de la harina de trigo por harina de maíz hasta un nivel del 10% reduce la fuerza de la masa y por tanto su capacidad fermentativa, como consecuencia de su menor contenido proteico, generando panes ligeramente más blandos, aunque no apreciable por los catadores, los cuales no evidencian ninguna diferencia con panes elaborados solo con harina de trigo.

La sustitución por harina de sorgo hasta el 10% genera un incremento en la viscosidad de la masa que no se traduce en un incremento en la fuerza de esta sino todo lo contrario, obteniéndose por tanto masas con baja capacidad fermentativa, aunque los panes obtenidos son los más similares texturalmente a los elaborados con harina de trigo. En cambio los catadores sí apreciaron diferencias en la textura al tacto, que junto con las de color, hacen que estos panes sean los peor evaluados.

En base al estudio se podría decir que salvo en el caso del uso de harina de sorgo, se podría realizar una sustitución parcial de la harina de trigo por harina de avena o maíz hasta el 10%, si bien se generan cambios evaluables que podrían ser mejorados a fin de que se asemejen más a panes elaborados con 100% harina de trigo.

BIBLIOGRAFÍA

AACC, 1995. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists. 9th Ed. The Association, St. Paul, MN, USA.

AACC, 2000. Approved Methods of American Association of Cereal Chemists. 10th Ed. The Association, St. Paul, MN, USA. Methods 56-11, 76-21.

Barak, S., Mudgil, D., Khatkar, B.S. 2013. Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties. *LWT-Food Science and Technology* (51) 211-217.

Batey, I.L. 2009. Interpretation of RVA Curves. In G. B. Crosbie & A. S. Ross (Eds.). *The RVA Handbook* (pp. 19-30). USA: AACC International.

Berton, B., Scher, J., Villieras, F., Hardy, J. 2002. Measurement of hydration capacity of wheat flour: Influence of composition and physical characteristics. *Powder Technology* (128) 326-331.

Blazek, J., Copeland, L. 2008. Pasting and swelling properties of wheat flour and starch in relation to amylose content. *Carbohydrate polymers* (71) 380-387.

Bloksma, A.H. 1990. Dough structure, rheology, and baking quality. *Cereal Foods World* (35) 237-244.

Brandolini, A., Hidalgo, A., Moscaritolo, S. 2008. Chemical composition and pasting properties of einkorn (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*) whole meal flour. *Journal of Cereal Science* (47) 599-609.

Chavan, J.K., Kadam, S.S., Ramka Reddy, N. 1993. Nutritional enrichment of bakery products by supplementation with nonwheat flours. *Critical Reviews in Food Science Nutrition* 33(3), 189-226.

Chiotellis, E., Campbell, G.M. 2003. Proving of Bread Dough II. Measurement of gas production and retention. *Trans IChemE, Vol. 81, Part C*, 207-216.

Dengate, H.N. 1984. Swelling, pasting, and gelling of wheat starch. In Pomeranz, Y. (Ed.). *Advances in cereal science and technology*. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, pp. 49-82.

Elías, L.G. 1999. *Concepto y Tecnologías para la Elaboración y Uso de Harinas Compuestas*. INCAP. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, (502).

Falade, K.O., Akingbala, J.O. 2008. Improved nutrition and national development through the utilization of cassava in baked foods. In: Robertson GL, Lupien JR (eds) Chapter 10 from *Using Food Science and Technology to Improve Nutrition and Promote National Development*. International Union of Food Science and Technology.

Fратиanni, A., Giuzio, L., Di Criscio, T., Zina, F., Panfili, G. 2013. Response of carotenoids and tocopherols of durum wheat in relation to water stress and sulfur fertilization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (61) 2583-2590.

Giannone, V., Lauro, M.R., Spina, A., Paqualone, A., Auditore, L., Puglisi, I., Puglisi, G. 2016. A novel α -amylase-lipase formulation as anti-staling agent in durum wheat bread. *LWT-Food Science and Technology* (65) 381-389.

Gilabert, E.J. 2002. *Medidas del color*. Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

Glenn, G.M., Saunders, R.M. 1990. Physical and structural properties of wheat endosperm associated with grain texture. *Cereal Chemistry* (67) 176-182.

Gómez, M.H., Rooney, L.W., Waniska, R.D., Pflugfelder, R.L. 1987. Dry corn masa flours for tortilla and snack food production. *Cereal Foods World* 32, 372.

Hareland, G.A. 1994. Evaluation of flour particle size distribution by Laser Diffraction, sieve analysis and Near-Infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Cereal Science* (21) 183-190.

Hernández, O., M., Duran, O., D. 2012. Características reológicas del pan de agua producto autóctono de Pamplona (Norte de Santander). *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas* 10(2): 61-74. Universidad de Pamplona. Colombia.

Hidalgo, A., Brandolini, A. 2008b. Kinetics of carotenoids degradation during the storage of einkorn (*Triticum monococcum* L. ssp. *Monococcum*) and bread wheat (*Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum*) flours. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (56) 11300-11305.

Hidalgo, A., Brandolini, A., Ratti, S. 2009. Influence of genetic and environmental factor on selected nutritional traits of *Triticum monococcum*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (57) 6342-6348.

Hoseney, R.C., 1992. Physical chemistry of bread dough. In: Schwartzberg, H.G., Hartel, R.W. (Eds.), *Physical Chemistry of Foods*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, Pp. 443–457.

Kieffer, R., Wieser, H., Henderson, M.H., Graveland, A. 1998. Correlations of the breadmaking performance of wheat flour with rheological measurements on a micro-scale. *Journal of Cereal Science* (27) 53-60.

Ktenioudaki, A., O'shea, N., Gallagher, E. 2013. Rheological properties of wheat dough substituted with functional by-products of food processing: Brewer's spent grain and apple pomace. *Journal of Food Engineering* (116) 362-368.

Lachman, J., Hejtmánková, K., Kotiková, Z. 2013. Tocols and carotenoids of einkorn, emmer and spring wheat varieties: Selection for breeding and production. *Journal of Cereal Science* (57) 207-214.

Lei, F., Ji Chung, T., Cai Ling, S., Chun, L. 2008. RVA and farinograph properties study on blends of resistant starch and wheat flour. *Agricultural Science in China* 7 (7) 812-822.

López, E.P, Goldner, M.C. 2015. Influence of storage time for the acceptability of bread formulated with lupine protein isolate and added brea gum. *LWT-Food Science Technology* (64) 1171-1178.

MacRitchie, F. 1976. The liquid phase of dough and its role in baking. *Cereal Chemistry* (53) 318-326.

Mepba, H., Eboh, L., Nwaojigwa, S.U. 2007. Chemical composition, functional and baking properties of wheat-plantain composite flours. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development* 7 (1) 152-160.

Newport Scientific. 1995. Interpretation, In Newport Scientific (Ed.), Operation manual for the series 3 Rapid Visco Analyser. Sydney: Newport Scientific Pty. Ltd, pp.25-28.

Ohimain, E.I. 2015. Recent advances in the production of partially substituted wheat and wheatless bread. Review Paper. *European Food Research Technology* (240) 257-271.

Pasha, I., Anjum, F.M., Butt, M.S. 2009. Genotypic variation of spring wheats for solvent retention capacities in relation to end-use quality. *LWT-Food Science and Technology* (42) 418-423.

Posner, E.S. 2009. Wheat flour milling. In K. Khan and P.R. Shewry (Eds.) *Wheat chemistry and technology* (pp. 119-152) (4th Ed.). St. Paul, MN, USA: AACC International.

Ram, S., Dawar, V., Singh, R.P., Shoran, J. 2005. Application of solvent retention capacity test for the prediction of mixing properties of wheat flour. *Journal of Cereal Science* (42) 261-266.

Rieder, A., Holtekjølen, A.K., Sahlstrøm, S., Moldestad, A. 2012. Effect of barley and oat flour types and sourdoughs on dough rheology and bread quality of composite wheat bread. *Journal of Cereal Science* (55) 44-52.

Seibel, W. 2006. Composite flours. In *Future of Flour: A Compendium of Flour Improvement*. Popper, L (ed). Verlag AgriMedia, pp. 193-198.

Shittu, T.A., Raji, A.O., Sanni, L.O. 2007. Bread from composite cassava-wheat flour: I. Effect of baking time and temperature on some physical properties of bread loaf. *Food Research International* (40) 280-290.

Singh, M., Liu, S.X., Vaughn, S.F. 2013. Effect of corn bran particle size on rheology and pasting characteristics of flour gels. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* (2) 138-142.

Soleimani Pour-Damanab, A.R., Jafary, A., Rafiee, Sh. 2011. Monitoring the dynamic density of dough during fermentation using digital imaging method. *Journal of Food Engineering* (107) 8-13.

Tadeu-Paraginski, R., Levien-Vanier, N., Berrios, J.J., De Oliveira, M., Cardoso-Elias, M. 2014. Physicochemical and pasting properties of maize as affected by storage temperature. *Journal of Stored Products Research* (59) 209-214.

Tsen, C.C., Mojibian, C.M., Inglett, G.E. 1974. Deffated corn germ flour as a nutrient fortifier for bread. *Cereal Chemistry* (51) 262-271.

Upadhyay, R., Ghosal, D., Mehra, A. 2012. Characterization of bread dough: Rheological properties and microstructure. *Journal of Food Engineering* (109) 104-113.

Villarino, C.B.J., Jayasena, V. Coorey, R., Chakrabarti-Bell, S., Johnson, S.K. 2015. The effects of Australian sweet lupin (ASL) variety on physical properties of flours and breads. *LWT-Food Science and Technology* (60) 435-443.

Verdú, S. Vásquez, F. Ivorra, E., Sánchez, A.J., Barat, J.M., Grau, R. 2015. Physicochemical effects of chia (*Salvia hispánica*) seed flour on each wheat bread-making process phase and product storage. *Journal of Cereal Science* (65) 67-73.

Zaidul, I.S.M., Karim, A.A., Manan, D.M.A. Norulaini, N.A.N, Omar, A.K.M 2003. Gelatinization properties of sago and wheat flour mixtures. *ASEAN Food Journal* (12) 585-598.

Zaidul, I.S.M., Yamauchi, H., Kim, S.J., Hashimoto, N., Noda, T. 2007. RVA study of mixtures of wheat flour and potato starches with different phosphorus content. *Food Chemistry* (102) 1105-1111.

Zaidul, I.S.M., Nik Norulaini, N.A., Mohd Omar, A.K., Yamauchi, H., Noda, T. 2007. RVA analysis of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, yam, and cassava starches. *Carbohydrates Polymers* (69) 784-791.

CAPÍTULO III

***MODIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS
HARINAS DE AVENA, MAÍZ Y SORGO PARA INCIDIR
SOBRE SU CAPACIDAD PANIFICADORA***

INTRODUCCIÓN

Al término de la molienda, la harina de trigo normalmente recibe ciertos tratamientos para mejorar alguna de sus propiedades, en particular puede ser la adición de aditivos tales como agentes de maduración u oxidantes (bromato de potasio, ácido ascórbico, azodicarbonamida o sulfato cúprico), blanqueadores (peróxidos, gases o cloro) o ingredientes para favorecer la fermentación. Los agentes de maduración provocan cambios en las propiedades físico-químicas de las harinas, similares a los que se llevan a cabo en el proceso de envejecimiento natural afectando las propiedades reológicas de la masa por lo tanto la capacidad de retención del gas por el gluten (Serna, 1996). Los agentes blanqueadores pueden ser agentes químicos que reducen el contenido de pigmentos amarillos, provocando una coloración más blanca en las harinas. Un tratamiento complementario a los mencionados anteriormente puede ser la aplicación de tratamientos térmicos en las harinas, ampliamente usados en la industria mucho antes de la eliminación del proceso de cloración (blanqueamiento de las harinas con dióxido de cloro) a principios de los años 90s (Chesterton et al., 2015).

Las harinas tratadas térmicamente se pueden utilizar en muchas aplicaciones dentro del procesamiento de alimentos, entre ellas están: la elaboración de alimentos infantiles, salsas, sopas, cremas y rellenos, espesantes, alimentos instantáneos, alimentos pre-cocidos, confitería, mayonesas, pan y productos de trigo, entre otros. Russo y Doe (1970), fueron los que patentaron este proceso usando un rango de temperatura de 100 a 115°C por 60 min y los primeros que citaron este proceso. Otros investigadores (Cauvain et al., 1976) sugirieron el tratamiento con calor en el grano de trigo y semolina los cuales fueron secados hasta llegar a un contenido de humedad de 6% para después ser tratados a una temperatura y tiempo específicos, siendo finalmente molido el grano de manera normal. Otros investigadores como Hanamoto y Bean (1979) patentaron un método para producir harina tratada con calor, utilizando una temperatura de 71°C durante 4 días. Estudios realizados por Nakamura et al., (2008), observaron un incremento en el volumen de Kasutera cake (pastel muy popular en Japón) cuando la harina de trigo fue calentada a 120°C por 30 min. Otras de las harinas de cereales

que han sido expuestas a tratamientos térmicos es la harina de sorgo. Estudios realizados por Marston et al., (2016), utilizaron harina de sorgo para la elaboración de pan libre de gluten, la cual fue tratada térmicamente por 95°C y 125°C a tiempos de 15, 30 y 45 min, observando efectos importantes en la viscosidad de la masa, volumen específico del pan y en el alveolado de la miga. Tratamientos térmicos en almidones también se han realizado. Así Jiranuntakul et al., (2011), aplicaron temperaturas de 100°C por 16 h a diferentes almidones de arroz, papa, maíz, entre otros, observando cambios importantes en la temperatura de empaste y en la viscosidad.

El tratamiento térmico a las harinas y la eliminación de humedad puede modificar las propiedades físicas, reológicas y bacteriológicas de las harinas. La eliminación de la humedad es primordial para lograr los cambios necesarios, sin embargo, es importante ajustar la humedad de la harina de nuevo a 12% (base húmeda) para lograr óptimos resultados de cocción (Neill et al., 2012). El tratamiento térmico afecta la extensibilidad del gluten y la absorción de agua, así como la gelatinización del almidón. En harinas utilizadas en la elaboración de pan se ha observado que el tratamiento térmico en la harina ha incrementado la resistencia, viscosidad y la rigidez (Gélinas et al., 2001). Estos efectos tienden a incrementar la elasticidad de la masa y producir un efecto positivo en el volumen del pan (Pylar, 1988).

Partiendo de los efectos positivos que podría introducir la aplicación de temperatura en las harinas es que se plantea como objetivo de este capítulo modificar las características de las harinas sustitutorias, mediante un tratamiento térmico, con la finalidad de incidir sobre su capacidad panificadora de manera que estas puedan ser mejoradas.

MATERIALES Y MÉTODOS

III.2.1 Tratamiento térmico de las harinas

Las harinas de avena (HA), maíz (HM) y sorgo (HS), descritas en los capítulos anteriores, fueron sometidas a un tratamiento térmico a tres temperaturas diferentes; 80, 100 y 130°C (Horno Modelo Fagor 2CF-3V) durante 30 min para ser utilizadas en la sustitución de la harina de trigo en porcentajes de 10 o 20%. Después de realizar el tratamiento térmico las harinas se acondicionaron a una temperatura de 25°C y 15% de humedad relativa en una cámara de fermentación (Modelo KBF720 Binder, Tuttlingen, Germany) durante 17 h, tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio.

III.2.2 Preparación de las mezclas de harinas

Las HA, HM y HS obtenidas después de haberse sometido al tratamiento térmico y acondicionamiento, fueron mezcladas con la HT en las proporciones siguientes: 10/90 y 20/80 (peso/peso), respectivamente. Dado los buenos resultados dados por los evaluadores en el análisis sensorial, para los panes elaborados con un nivel de sustitución del 10%, en el presente capítulo se incrementó el nivel de sustitución hasta un 20%.

III.2.3 Caracterización de las harinas

La caracterización de las mezclas de harinas se realizó empleando las mismas técnicas descritas en el capítulo anterior. Para ello se determinó la distribución del tamaño de partícula (DTP) (Villarino et al., 2015), color (Gilabert, 2002), capacidad de retención de agua método 56-11 (AACC, 2000) y análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA) método 76-21 (AACC, 2000) (Shittu et al., 2007).

III.2.4 Análisis en masas

El procedimiento para la elaboración de la masa y la medición de la capacidad fermentativa de las masas mediante la evaluación del volumen a una hora de fermentación, se realizó siguiendo el proceso descrito en el capítulo anterior.

III.2.5 Análisis en pan

Con la finalidad de reducir el número de muestras a evaluar en este punto, es decir, el número de panes diferentes a evaluar, solo se elaboraron y analizaron aquellas formulaciones cuya capacidad fermentativa fue igual a la del control HT.

III.2.5.1 Elaboración del pan y pérdida de peso durante el horneado

Al igual que los análisis anteriores, la elaboración del pan y la determinación de la pérdida de peso durante el horneado, se realizó de la misma manera que en el capítulo anterior.

III.2.5.2 Análisis de envejecimiento

El análisis de envejecimiento se basó en la evaluación de los parámetros de textura, variación de peso y actividad de agua a los 0, 2 y 7 días, los cuales dan una idea de la estabilidad del pan durante el periodo de consumo (Verdú et al., 2015). Las condiciones de la muestra analizada, así como el equipo y los parámetros de medición son los mismos a los utilizados en el capítulo anterior para cada una de los análisis.

III.2.5.3 Análisis sensorial

Al igual que en el capítulo 2, los panes tras su elaboración fueron evaluados sensorialmente, siguiendo el mismo protocolo que en el capítulo anterior.

III.2.6 Análisis estadístico

Los resultados se analizaron aplicando un procedimiento de comparación múltiple para determinar que medias son significativamente diferentes de otras. Para discriminar entre las medias se utilizó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. El Análisis estadístico se llevó a cabo con el programa Statgraphics Centurion XVI con un nivel de confianza del 95%. Para este estudio estadístico, en aquellos casos en los que fue posible y con la finalidad de poder evaluar la incidencia del tratamiento térmico, se incorporaron los valores para HT, HT: HA 10%, HT: HM 10% y HT: HS 10% sin tratamiento térmico del capítulo anterior.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.3.1 Caracterización de las harinas

III.3.1.1 Distribución de tamaño de partícula (DTP)

En la Tabla III.1 se muestran los valores de tamaño de partícula obtenidos para las mezclas de harinas resultado de la sustitución de HT por HA, HM o HS al 10 o 20% (tratadas térmicamente a 80, 100 o 130°C durante 30 min), así como para HT y HT: HA 10%, HT: HM 10% y HT: HS 10% sin tratamiento térmico. Al analizar los valores de $D[4,3]$ μm obtenidos cuando la harina de sustitución fue HA, el análisis estadístico de la varianza mostró que los factores temperatura, % de sustitución y la interacción entre ambos tuvieron un efecto significativo. Así, la única combinación que no presentó variación con el patrón HT (92.42 ± 0.88) fue cuando se empleó la HA al 10% con tratamiento térmico de 130°C/30 min, siendo los valores obtenidos para el resto de mezclas superiores. El análisis del efecto del tratamiento térmico cuando el grado de sustitución fue del 10% o del 20% no mostró diferencias significativas por el efecto de las diferentes temperaturas empleadas salvo para las mezclas HT: HA al 10% con tratamiento térmico de 130°C/30 min y HT: HA al 20% con tratamiento térmico de 80°C/30 min, las cuales obtuvieron el menor (105.53 ± 1.10) y mayor valor (147.03 ± 13.33), respectivamente.

Al utilizar HM en la sustitución de HT, igual que en el caso anterior el análisis de varianza obtenido mostró que los factores temperatura o % de sustitución tuvieron un efecto significativo. Las únicas mezclas que presentaron valores iguales a la harina patrón HT fueron las tratadas térmicamente a mayor temperatura (130°C), para ambos grados de sustitución (10 y 20%) siendo los valores obtenidos de 103.05 ± 1.28 y 105.94 ± 0.76 , respectivamente. Para el resto de mezclas los valores obtenidos fueron superiores al de HT y también superiores al obtenido por la harina sustituida al 10% sin tratamiento térmico, lo que podría mostrar que la aplicación de un tratamiento térmico suave incrementa el tamaño de partícula, pero que con uno más intenso este se reduce incluso llegando al valor del tamaño de la harina HT. Los resultados obtenidos al utilizar HS tratada térmicamente a 80, 100 o 130°C/30 a un nivel

de sustitución del 10% no mostraron diferencias significativas con respecto a HT, del mismo modo que no lo mostró la sustituida al 10% sin tratamiento térmico. En cambio, cuando el nivel de sustitución fue del 20%, si se tuvieron diferencias significativas con respecto a HT, siendo los valores obtenidos superiores cuanto mayor fue la intensidad del tratamiento térmico.

Tabla III.1. Distribución del tamaño de partícula (DTP) de HT sustituida con HA, HM o HS al 10 o 20% (tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos), así como de HT y de HT: HA, HT: HM y HT: HS al 10% sin tratamiento térmico.

<i>Harina</i>	<i>d(0.1) μm</i>	<i>d(0.5) μm</i>	<i>d(0.9) μm</i>	<i>D[4,3] μm</i>
HT	25.53 ± 1.15 a	92.32 ± 0.63 a	181.11 ± 0.80 a	99.42 ± 0.88 a
HT: HA 10%	23.25 ± 0.23 h	96.02 ± 0.77 h	200.73 ± 2.87 cdef	114.21 ± 3.74 bcde
HT: HA 10% (80°C/30 min)	21.01 ± 0.07 c	89.82 ± 0.30 e	198.14 ± 1.86 bcde	113.21 ± 2.28 de
HT: HA 10% (100°C/30 min)	21.07 ± 0.16 c	90.44 ± 0.50 ebc	200.29 ± 2.47 cdef	113.92 ± 3.07 bcde
HT: HA 10% (130°C/30 min)	21.28 ± 0.09 c	89.98 ± 0.26 eb	195.53 ± 1.47 bcd	105.53 ± 1.10 ab
HT: HA 20% (80°C/30 min)	20.08 ± 0.21 bi	94.23 ± 1.72 f	260.95 ± 21.39 j	147.03 ± 13.33 h
HT: HA 20% (100°C/30 min)	19.88 ± 0.11 i	91.28 ± 0.59 acd	226.57 ± 4.03 h	118.61 ± 2.61 def
HT: HA 20% (130°C/30 min)	19.93 ± 0.12 i	91.10 ± 0.63 bcd	224.54 ± 3.58 h	116.78 ± 4.48 def
HT: HM 10%	26.24 ± 0.68 j	102.36 ± 2.84 k	205.82 ± 6.15 efg	111.87 ± 3.37 bcd
HT: HM 10% (80°C/30 min)	22.43 ± 0.23 de	94.75 ± 0.26 fg	206.64 ± 1.71 fg	119.42 ± 0.86 def
HT: HM 10% (100°C/30 min)	22.94 ± 0.14 fgh	95.54 ± 0.52 gh	209.57 ± 1.98 g	124.19 ± 2.92 fg
HT: HM 10% (130°C/30 min)	22.29 ± 0.14 d	92.15 ± 1.06 ad	195.45 ± 2.55 bc	103.05 ± 1.28 a
HT: HM 20% (80°C/30 min)	21.23 ± 0.13 c	96.05 ± 0.87 h	209.27 ± 6.43 g	114.57 ± 12.21 cde
HT: HM 20% (100°C/30 min)	20.99 ± 0.55 c	97.30 ± 1.90 i	221.56 ± 15.09 h	132.30 ± 23.44 g
HT: HM 20% (130°C/30 min)	20.44 ± 0.36 b	94.92 ± 0.51 fgh	204.13 ± 1.98 efg	105.94 ± 0.76 ab
HT: HS 10%	23.18 ± 0.33 fgh	94.77 ± 0.43 fg	201.98 ± 0.90 cdefg	106.48 ± 0.50 abc
HT: HS 10% (80°C/30 min)	22.11 ± 0.15 d	91.91 ± 0.34 ad	191.30 ± 0.69 b	101.30 ± 0.44 a
HT: HS 10% (100°C/30 min)	22.83 ± 0.13 efg	94.10 ± 0.45 f	203.65 ± 1.25 efg	107.18 ± 0.82 abc
HT: HS 10% (130°C/30 min)	22.83 ± 0.09 efg	94.12 ± 0.32 f	203.46 ± 0.93 defg	106.77 ± 0.42 abc
HT: HS 20% (80°C/30 min)	23.24 ± 0.07 gh	100.68 ± 0.25 j	237.84 ± 1.55 i	119.88 ± 0.77 def
HT: HS 20% (100°C/30 min)	23.35 ± 0.13 h	101.13 ± 0.70 j	240.02 ± 4.37 i	122.57 ± 5.51 ef
HT: HS 20% (130°C/30 min)	22.82 ± 0.20 ef	100.90 ± 0.89 j	240.21 ± 9.83 i	124.88 ± 10.95 fg

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. Valores dentro del paréntesis (columna harina) indican temperatura y tiempo al que fueron tratadas las harinas sustitutorias. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

Estudios realizados por Kim et al., (2004), observaron que la distribución del tamaño de partícula de las harinas de trigo era dependiente de la temperatura. La aplicación de 60°C mostró cambios significativos en el

tamaño y la distribución de las partículas de las harinas. Este resultado se lo atribuyeron al hinchamiento de los gránulos de almidón en respuesta al incremento de temperatura. Estudios realizados por Neill et al., (2012), determinaron que la harina tratada con calor puede ser usada en muchas aplicaciones en el procesamiento de alimentos. También concluyeron que la utilización de este tipo de harinas desarrolla productos con mayor vida de anaquel, textura más fina, miga más húmeda y sabor más dulce. Además, el tratamiento por calor disminuyó la extensibilidad del gluten y la parcial gelatinización de los gránulos de almidón. La aplicación de estos tratamientos con temperatura genera cambios en la distribución del tamaño de partícula de las harinas (Kim et al., 2004), principalmente en la fracción amilosa, que por su características lineales facilita su degradación en comparación con amilopectina que es mucho más ramificada (Labanowska et al., 2013). Rasper y DeMan (1980) realizaron estudios en harinas de trigo y observaron que durante el calentamiento de estas se presenta un hinchamiento que contribuye significativamente al desarrollo de las propiedades reológicas.

III.3.1.2 Determinación de color

Los resultados para las coordenadas de color L^* , a^* , b^* , C^* y H^* , se muestran en la Tabla III.2. Al igual que en las harinas sin tratamiento térmico analizadas en el Capítulo II, el valor más alto observado para el parámetro L^* fue el obtenido por las harinas HT (95.94 ± 0.17) obteniéndose diferencias significativas con el resto de las mezclas de harinas. En base a este resultado se puede concluir que el tratamiento térmico no mejora los valores de luminosidad hasta los valores del patrón HT, si bien para las harinas con una sustitución al 10% con HA y las sustituidas con HM al 10 y 20%, el tratamiento térmico si incrementó el valor de L^* independientemente de la intensidad de este.

Con respecto al parámetro a^* todas las mezclas tuvieron diferencias significativas con respecto a HT (4.58 ± 0.03) excepto las sustituciones realizadas con HS al 10% tratada a 80, 100 o 130°C/30 min. Para el resto de

harinas el tratamiento térmico no pareció ser influyente, obteniéndose para las sustituciones con HA y HM valores muy cercanos al de HT, de igual forma que lo hacían las mismas harinas no tratadas.

En relación al parámetro b^* , el tratamiento térmico si tuvo un efecto significativo sobre las harinas sustituidas con HA tratada, descendiendo el valor de b^* con respecto a la no tratada hasta valores sin diferencias significativas con la HT a excepción de la harina HT: HA 20% tratada a 130°C por 30 min cuyo valor fue más elevado (4.41 ± 0.13). Al utilizar HM en la sustitución, en todas las mezclas resultantes se apreciaron diferencias significativas con respecto a HT. Para las sustituciones al 10%, el tratamiento térmico fue influyente descendiendo el valor de b^* pero a valores aún muy lejanos al de HT. Los valores más altos para este parámetro fueron obtenidos cuando HT fue sustituida al 20% con HM tratada a 80 o 100°C/30 min (6.42 ± 0.16 o 6.48 ± 0.12), respectivamente. En lo que respecta a las sustituciones realizadas con HS, si bien inicialmente el tratamiento térmico a 80°C produjo un descenso de b^* , al incrementar la intensidad de este, se produjo un cambio de forma que las harinas HT: HS 10% (100°C/30 min) y HT: HS 20% (80°C/30 min) no mostraron diferencias significativas con respecto a HT.

En lo que se refiere al valor de C^* , al igual que b^* , el tratamiento térmico tuvo efectos significativos al utilizar HA en la sustitución. Se observa una disminución con respecto a la no tratada, excepto para la harina HT: HA 20% tratada a 130°C por 30 min que presentó el valor más alto (6.43 ± 0.09). Cuando la sustitución fue realizada con HM se observaron diferencias significativas con respecto a HT. El tratamiento térmico marco una influencia importante cuando las sustituciones se realizaron al 10%, logrando un descenso del valor de b^* . Contrario a esto fue cuando la HT fue sustituida al 20% con HM, tratada a 80 o 100°C/30 min, donde se observaron los valores más altos (7.35 ± 0.14 o 7.38 ± 0.08) respectivamente. Al utilizar HS al 10% en la sustitución, se observa una disminución de C^* en el tratamiento térmico de 80°C, sin embargo este no muestra diferencias significativas con respecto a la harina HT. Al aumentar la temperatura de tratamiento a 100°C se logra un incremento (5.33 ± 0.06) si bien tampoco se producen diferencias con respecto a HT. Los incrementos en sustitución al 20% fueron más afectados

cuando se utilizó el tratamiento térmico de 130°C que fue donde se observó el valor más alto para este parámetro (7.58 ± 0.08).

Finalmente el valor H^* que mostró un comportamiento irregular cuando HT fue sustituida con HA o HM, sin embargo, se alcanza apreciar que cuando la HT fue sustituida al 10% con HA tratada a 100 o 130°C no hay cambios significativos con respecto a HT, en estos casos la temperatura de tratamiento no fue un efecto para influir en el resultado de las dos sustituciones mencionadas anteriormente. Sin embargo, al utilizar la sustitución del 20% de HA, el valor de H^* se incrementó cuando esta fue tratada a 130°C (43.28 ± 0.9). Cuando se utilizó HM en la sustitución, todas las mezclas mostraron diferencias con respecto a HT. El tratamiento térmico mostró una influencia importante en este nivel de sustitución, lo cual fue más evidente cuando la HM fue tratada a 130°C (45.34 ± 1.3), siendo este valor menor y con diferencia significativa a los obtenidos cuando HM fue tratada a 80 o 100°C (51.34 ± 0.87 o 51.19 ± 0.84 , respectivamente). Al utilizar HM al 20%, el efecto del tratamiento térmico fue muy semejante a la sustitución realizada al 10%, siendo el tratamiento de 130°C el que más efecto tuvo en el valor de este parámetro (51.75 ± 0.63), mostrando diferencias con respecto a la HM tratada a 80 o 100°C. Cuando se utilizó HS en la sustitución, se observó que el tratamiento térmico a 80°C produjo un descenso de H^* , para los dos niveles de sustitución. Sin embargo, al incrementar la temperatura se logró apreciar que los valores para las harinas HT: HS 10% (100°C/30 min) y HT: HS 20% (100°C/30 min) no mostraron diferencias significativas con respecto a HT.

Tabla III.2. Determinación de color de HT sustituida con HA, HM o HS al 10 o 20% (tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos), así como de HT y de HT: HA, HT: HM y HT: HS al 10% sin tratamiento térmico.

Harina	L*	a*	b*	C*	H*
HT	95.94 ± 0.17 a	4.58 ± 0.03 a	2.76 ± 0.09 ac	5.37 ± 0.02 ae	31.46 ± 0.52 ac
HT: HA 10%	93.95 ± 0.37 efg	4.34 ± 0.01 def	3.34 ± 0.11 e	5.48 ± 0.08 e	37.62 ± 0.88 h
HT: HA 10% (80°C/30 min)	94.86 ± 0.16 ij	4.30 ± 0.01 de	2.79 ± 0.1 bcd	5.13 ± 0.06 bd	33.03 ± 0.94 ef
HT: HA 10% (100°C/30 min)	95.10 ± 0.14 jk	4.29 ± 0.01 d	2.63 ± 0.06 ab	5.04 ± 0.04 d	31.52 ± 0.57 ac
HT: HA 10% (130°C/30 min)	94.77 ± 0.08 i	4.45 ± 0.01 g	2.80 ± 0.06 bcd	5.26 ± 0.02 ac	32.20 ± 0.61 ae
HT: HA 20% (80°C/30 min)	93.95 ± 0.17 efg	4.39 ± 0.03 fg	2.79 ± 0.17 bcd	5.25 ± 0.06 c	33.23 ± 0.53 ef
HT: HA 20% (100°C/30 min)	93.85 ± 0.18 def	4.35 ± 0.02 ef	2.88 ± 0.08 cd	5.22 ± 0.04 bc	33.48 ± 0.83 f
HT: HA 20% (130°C/30 min)	92.99 ± 0.2 c	4.68 ± 0.03 i	4.41 ± 0.13 g	6.43 ± 0.09 j	43.28 ± 0.9 i
HT: HM 10%	94.71 ± 0.33 i	3.86 ± 0.10 b	5.94 ± 0.19 k	7.11 ± 0.17 k	56.73 ± 0.81 l
HT: HM 10% (80°C/30 min)	95.43 ± 0.06 l	3.90 ± 0.03 b	4.83 ± 0.15 h	6.24 ± 0.08 i	51.34 ± 0.87 k
HT: HM 10% (100°C/30 min)	95.44 ± 0.18 l	3.88 ± 0.02 b	4.78 ± 0.16 h	6.19 ± 0.11 i	51.19 ± 0.84 k
HT: HM 10% (130°C/30 min)	95.04 ± 0.21 jk	4.21 ± 0.04 c	4.27 ± 0.2 g	6.00 ± 0.15 h	45.34 ± 1.3 j
HT: HM 20% (80°C/30 min)	95.48 ± 0.29 l	3.56 ± 0.02 h	6.42 ± 0.16 l	7.35 ± 0.14 l	61.01 ± 0.45 m
HT: HM 20% (100°C/30 min)	95.16 ± 0.08 k	3.53 ± 0.05 h	6.48 ± 0.12 l	7.38 ± 0.08 l	61.44 ± 0.77 m
HT: HM 20% (130°C/30 min)	94.38 ± 0.12 h	4.44 ± 0.02 g	5.63 ± 0.16 j	7.17 ± 0.10 k	51.75 ± 0.63 k
HT: HS 10%	93.80 ± 0.06 de	4.67 ± 0.02 i	3.24 ± 0.05 e	5.68 ± 0.04 f	34.73 ± 0.40 g
HT: HS 10% (80°C/30 min)	94.14 ± 0.16 gh	4.60 ± 0.03 a	2.56 ± 0.09 a	5.26 ± 0.06 ac	29.15 ± 0.89 d
HT: HS 10% (100°C/30 min)	94.10 ± 0.3 fg	4.59 ± 0.04 a	2.72 ± 0.08 abc	5.33 ± 0.06 ac	30.65 ± 0.69 bc
HT: HS 10% (130°C/30 min)	93.69 ± 0.14 d	4.62 ± 0.09 ai	3.52 ± 0.15 f	5.84 ± 0.12 g	37.17 ± 1.21 h
HT: HS 20% (80°C/30 min)	92.65 ± 0.19 b	4.92 ± 0.04 j	2.86 ± 0.23 cd	5.70 ± 0.10 f	30.16 ± 2.17 db
HT: HS 20% (100°C/30 min)	92.71 ± 0.05 b	4.90 ± 0.05 j	2.95 ± 0.19 d	5.72 ± 0.11 fg	31.05 ± 1.61 abc
HT: HS 20% (130°C/30 min)	90.67 ± 0.24 m	5.33 ± 0.05 k	5.39 ± 0.12 i	7.58 ± 0.08 m	45.29 ± 0.78 j

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. Valores dentro del paréntesis indican temperatura y tiempo al que fueron tratadas las harinas sustitutorias. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

III.3.1.3 Capacidad de retención de agua (CRA)

Una vez realizados los ensayos y obtenidos los resultados, estos fueron procesados comparándolos con los obtenidos para la harina patrón HT y para las sustituidas al 10% sin tratamiento térmico. Así en las Figuras III.1, III.2 y III.3 se muestran los valores de las HT: HA, HT: HM y HT: HS, respectivamente, para los dos niveles de sustitución evaluados (10 y 20%) y tratadas a las tres temperaturas estudiadas (80, 100 y 130°C) durante 30 minutos. Además, en las figuras en las que se muestran los datos como una superficie de respuesta también se muestran mediante una línea los valores obtenidos para la harina

HT y para cada una de las sustituidas al 10% sin tratamiento térmico. Como se observa en la Figura III.1 cuando las harinas con sustitución parcial de HT por HA fueron tratadas térmicamente independientemente de la intensidad de éste y del grado de sustitución, la CRA aumentó con respecto a la sustitución sin tratamiento térmico (HT: HS 10% = 66.5), llegando en el caso de la harina con un 20% de sustitución y con un tratamiento térmico a 100°C a alcanzar un valor superior (69.32 ± 0.61) al de la harina HT (69.15). Además del tratamiento térmico, el grado de sustitución también se mostró significativo y como se puede apreciar en la figura, los valores para el nivel de sustitución 10% fueron menores que para 20%.

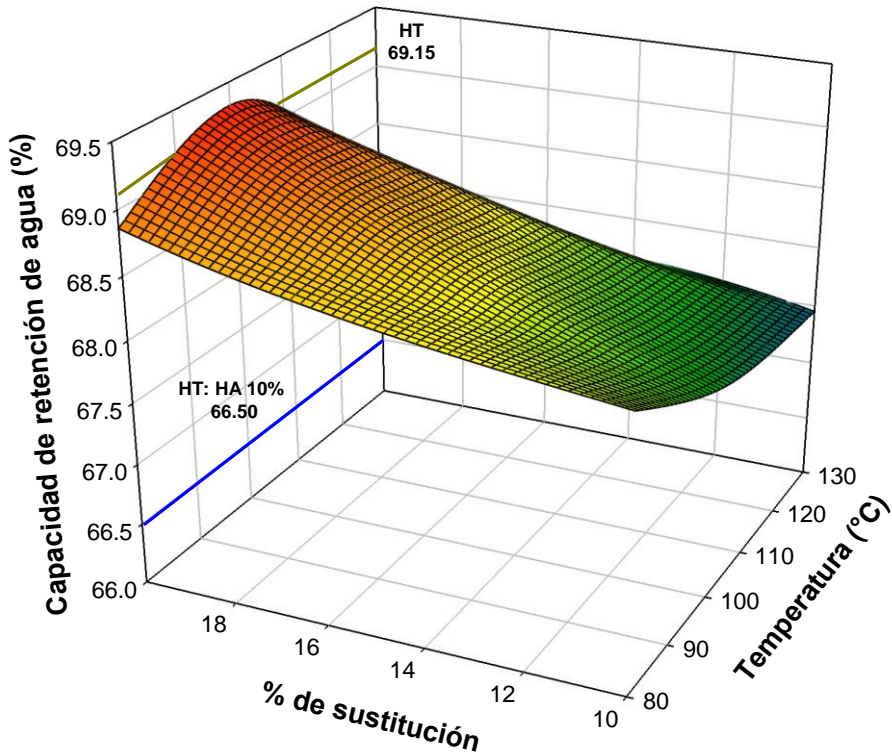


Figura III.1. Gráfico de superficie para los valores de capacidad de retención de agua de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HA (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HA 10% (mezcla harina de trigo y harina de avena al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).

Cuando la harina fue sustituida por HM, si bien se produjo un ligero efecto del tratamiento térmico respecto a la no tratada este fue muy pequeño, obteniéndose valores muy lejanos a los observados por la harina HT (Figura III.2). Los valores más altos fueron observados cuando se utilizó HM al 10% (66.76 ± 0.73) o 20% (66.88 ± 0.44), ambas tratadas a 100°C , temperatura que ya se mostró como la más influyente para las sustituciones con HA.

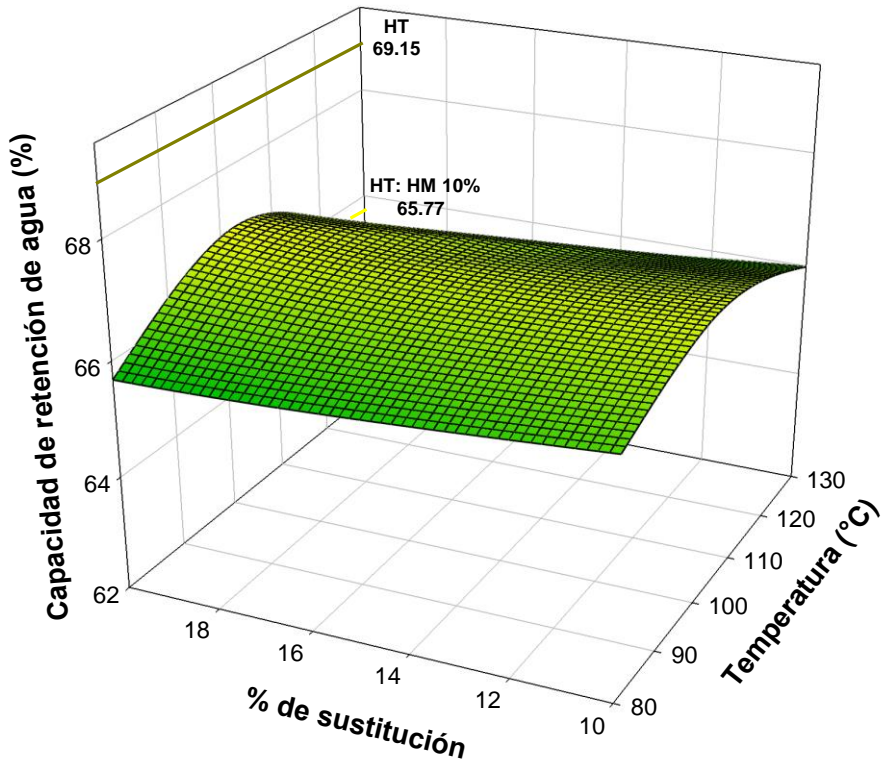


Figura III.2. Gráfico de superficie para los valores de capacidad de retención de agua de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HM (tratada a 80, 100 o $130^{\circ}\text{C}/30$ min). — HT: HM 10% (mezcla harina de trigo y harina de maíz al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).

Finalmente, los resultados obtenidos cuando se utilizó HS en la sustitución de HT bajo las mismas condiciones de tratamiento se muestran en la Figura III.3. Como puede observarse, el efecto del tratamiento térmico fue muy influyente si bien de forma negativa. Al tratar térmicamente las harinas HS,

independientemente de la intensidad de este y del grado de sustitución de la harina, se produjo un descenso muy acusado de la CRA. Si bien cuando se estudió la incorporación de HS al 10% sin tratamiento térmico se apreció un ligero incremento en la CRA, esta descendió bruscamente con el tratamiento térmico en todos los casos.

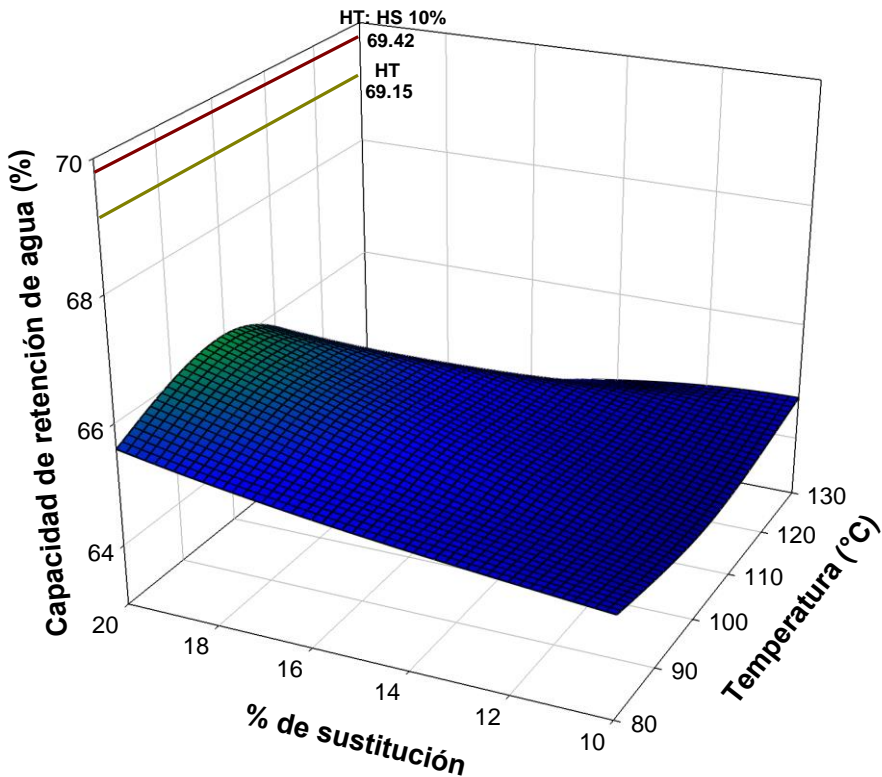


Figura III.3. Gráfico de superficie para los valores de capacidad de retención de agua de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HS (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HS 10% (mezcla harina de trigo y harina de sorgo al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).

III.3.1.4 Análisis de viscosidad: Rapid Visco Analyser (RVA)

La Figura III.4 muestra los resultados obtenidos de temperatura de empaste para las harinas tratadas térmicamente así como para el patrón HT y las sustituidas al 10% con los mismos cereales pero sin tratamiento térmico. Como se observa en el caso de las harinas sustituidas parcialmente con HA el efecto del tratamiento térmico solo tuvo un efecto significativo cuando las harinas sustituidas al 10 y 20% fueron tratadas a 130°C obteniéndose un descenso muy brusco de este parámetro (67.67 ± 1.30 ; 69.35 ± 0 , respectivamente) hasta alcanzar el valor de la harina de referencia HT (68.95 ± 0.63).

Cuando la harina utilizada en la sustitución fue HM, el efecto del tratamiento térmico fue muy ligero, observándose un ligero descenso para el nivel de sustitución 20% tratadas a 80 y 100°C (82.22 ± 1.09 y 83.12 ± 0.08 respectivamente), si bien este descenso no fue representativo con respecto al valor de HT.

Finalmente, al ser utilizada HS, el efecto del tratamiento térmico fue el menor, solo evidenciándose diferencias significativas respecto a la harina no tratada térmicamente cuando se utilizó un nivel de sustitución del 10% y un tratamiento a 130°C.

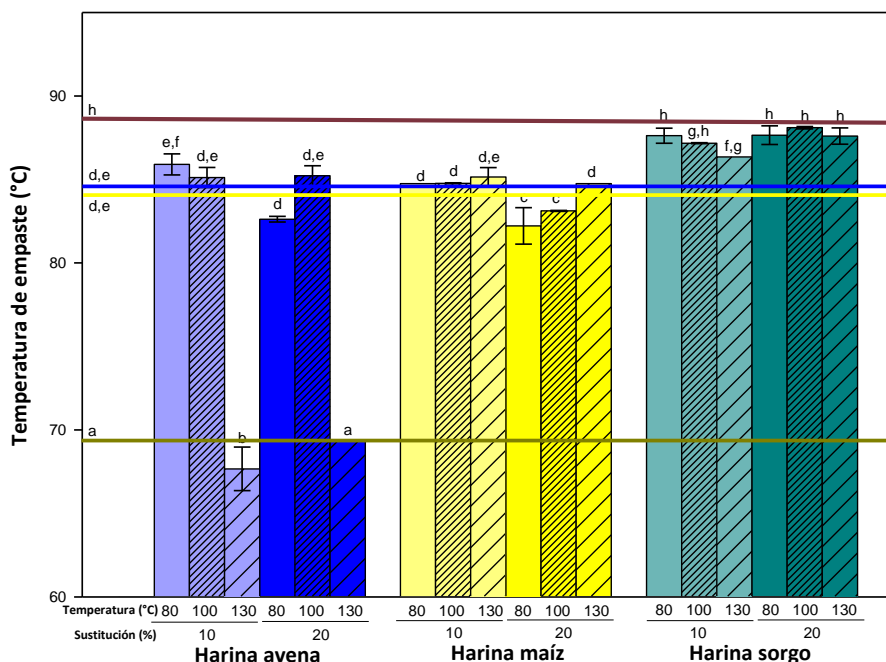


Figura III.4. Temperatura de empaste de las mezclas de HT sustituidas al 10 o 20% con harina de avena (HA), harina de maíz (HM) o harina de sorgo (HS) tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos. — Harina de trigo (HT); — HT: HA 10% sin tratamiento térmico; — HT: HM 10% sin tratamiento térmico; — HT: HS 10% sin tratamiento térmico.

En relación a viscosidad pico, los resultados se pueden apreciar en la Figura III.5. Como se observa, el tratamiento térmico influyó sobre este parámetro. En general, el tratamiento térmico más suave (80°C) hizo incrementar los valores de éste en todas las harinas y para los dos niveles de sustitución (a excepción de la HS con un nivel de sustitución del 20%), alcanzando valores muy superiores a los de la harina HT (2245 ± 15.55) y a los de sus respectivas mezclas al 10% sin tratamiento térmico, las cuales tuvieron valores similares a los de HT. Pero con el incremento de la intensidad, los valores fueron disminuyendo alcanzando en algún caso (HT: HS 20% a 130/30 min) un valor muy inferior al de la no tratada térmicamente.

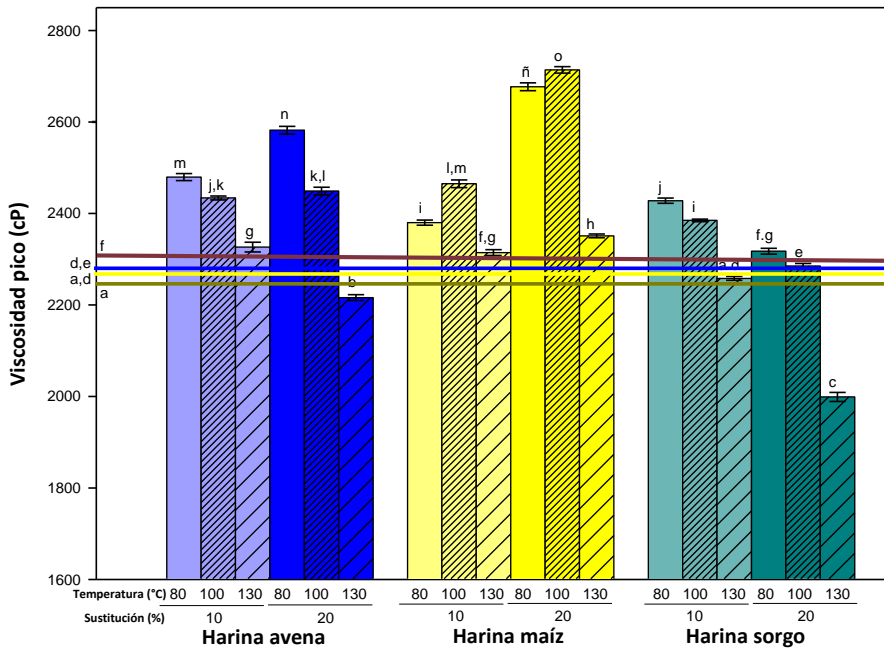


Figura III.5. Viscosidad pico de las mezclas de HT sustituidas al 10 o 20% con harina de avena (HA), harina de maíz (HM) o harina de sorgo (HS) tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos. — Harina de trigo (HT); — HT: HA 10% sin tratamiento térmico; — HT: HM 10% sin tratamiento térmico; — HT: HS 10% sin tratamiento térmico.

En el caso de la viscosidad final (Figura III.6) se observó un efecto del tratamiento térmico similar al observado en la viscosidad pico. En términos generales la aplicación del tratamiento térmico a 80°C produjo un incremento en la viscosidad final, la cual fue más acusada cuanto mayor fue el grado de sustitución, alcanzando valores superiores a las no tratadas térmicamente, siendo este comportamiento muy acusado para las harinas con HM y HS. Pero con el incremento de la intensidad del tratamiento térmico se produjo un descenso de la viscosidad final, si bien solo en el caso de la harina HT: HS 10% a 80°C durante 30 minutos se alcanzó el nivel de la harina no tratada térmicamente.

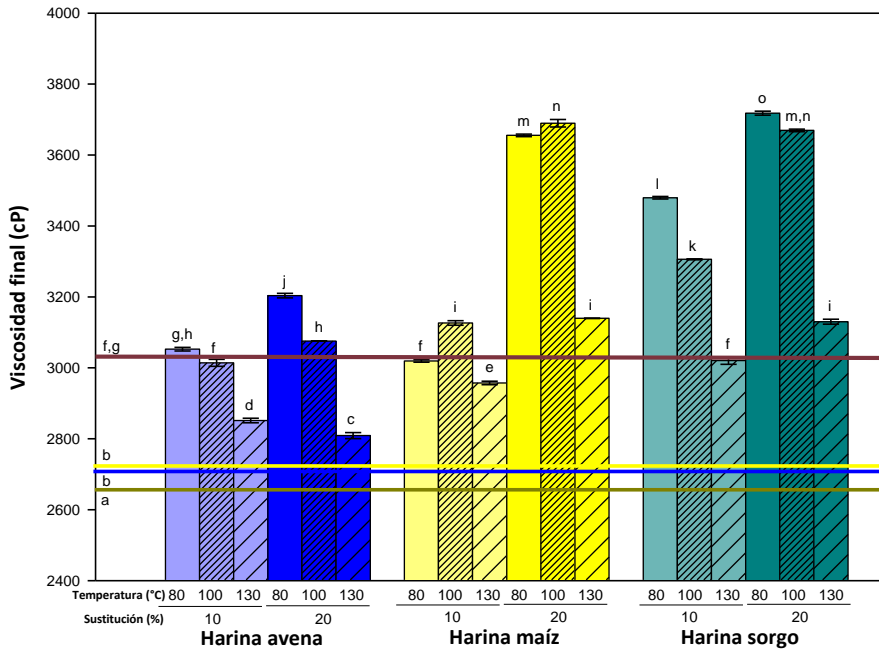


Figura III.6. Viscosidad final de las mezclas de HT sustituidas al 10 o 20% con harina de avena (HA), harina de maíz (HM) o harina de sorgo (HS) tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos. — Harina de trigo (HT); — HT: HA 10% sin tratamiento térmico; — HT: HM 10% sin tratamiento térmico; — HT: HS 10% sin tratamiento térmico.

Los resultados obtenidos de viscosidad mínima, viscosidad de ruptura y viscosidad de restitución se muestran en la Tabla III.3. La viscosidad mínima mostró diferencias significativas con respecto al obtenido por HT (1421.5 ± 4.94), excepto el obtenido al sustituir HT con HS al 10% sin tratamiento térmico (1422 ± 7.07). Al ser utilizada HA en la sustitución se logra apreciar cómo disminuye la viscosidad a medida que se incrementa el tratamiento térmico para la sustitución de 10 o 20%. Este mismo comportamiento es observado al utilizar HS en las mismas condiciones de sustitución o tratamiento térmico que HA. También se observa como al incrementar la temperatura de tratamiento a 130°C los valores más bajos de viscosidad (1378.5 ± 9.19 y 1335 ± 11.31) son obtenidos para estos dos cereales sustitutorios (HA o HS). Al igual que la viscosidad final la influencia estadística

significativa estuvo determinada por los factores temperatura, % de sustitución y la interacción de ambas. En lo que respecta al comportamiento de HM para este análisis, incrementos en esta medición en harinas tratadas a 80 o 100°C/30 min fueron observados para los dos niveles de sustitución, sin embargo, una disminución importante es apreciada en HM tratada a 130°C al ser utilizada al 10 o 20% (1482.5 ± 9.19 o 1541 ± 5.65) en sustitución de HT. El análisis de varianza mostro la influencia significativa por los factores temperatura, % de sustitución y la interacción de ambos al igual que los observados al utilizar HA o HS.

Tabla III.3. Resultados de viscosidad mínima, viscosidad de ruptura y viscosidad de restitución de HT y HT sustituida con HA, HM o HS al 10 o 20% (tratadas a 80, 100 o 130°C/30 min). Mezclas de HT: HA 10%, HT: HM 10% y HT: HS 10%, sin tratamiento térmico.

Harina	Viscosidad mínima (cP)	Viscosidad de ruptura (cP)	Viscosidad de restitución (cP)
HT	1421.5 ± 4.94 a	823.5 ± 10.6 aef	1238.5 ± 10.6 a
HT: HA 10%	1476 ± 36.76 e	790.5 ± 24.74 c	1239 ± 22.62 a
HT: HA 10% (80°C/30 min)	1633.5 ± 0.7 h	846 ± 7.07 gh	1414 ± 11.31 c
HT: HA 10% (100°C/30 min)	1610 ± 4.24 h	849.5 ± 3.53 h	1408 ± 0 c
HT: HA 10% (130°C/30 min)	1393.5 ± 4.94 c	933 ± 5.65 k	1453 ± 8.48 de
HT: HA 20% (80°C/30 min)	1781 ± 4.24 k	821 ± 9.89 ae	1437.5 ± 4.94 cd
HT: HA 20% (100°C/30 min)	1623.5 ± 4.94 h	825.5 ± 3.53 aefg	1452 ± 4.24 de
HT: HA 20% (130°C/30 min)	1378.5 ± 9.19 bc	843 ± 9.89 fgh	1434 ± 5.65 cd
HT: HM 10%	1369.5 ± 24.74 b	890.5 ± 10.6 ij	1358.5 ± 50.2 b
HT: HM 10% (80°C/30 min)	1477 ± 7.07 e	897.5 ± 6.36 ij	1546 ± 5.65 f
HT: HM 10% (100°C/30 min)	1541.5 ± 6.36 g	923.5 ± 2.12 k	1582 ± 4.24 fg
HT: HM 10% (130°C/30 min)	1482.5 ± 9.19 e	836 ± 9.89 efgh	1481.5 ± 4.94 e
HT: HM 20% (80°C/30 min)	1682 ± 5.65 i	1022.5 ± 4.94 l	1989 ± 9.89 j
HT: HM 20% (100°C/30 min)	1711.5 ± 7.77 j	1007 ± 8.48 l	1978 ± 2.82 ij
HT: HM 20% (130°C/30 min)	1541 ± 5.65 g	810 ± 9.89 ac	1598.5 ± 4.94 g
HT: HS 10%	1422 ± 7.07 a	884.5 ± 26.16 ij	1607.5 ± 54.44 g
HT: HS 10% (80°C/30 min)	1527 ± 2.82 fg	901 ± 8.48 j	1947.5 ± 7.77 i
HT: HS 10% (100°C/30 min)	1517 ± 8.18 f	878 ± 5.65 i	1799 ± 9.89 h
HT: HS 10% (130°C/30 min)	1465.5 ± 6.36 e	807.5 ± 3.53 ac	1560 ± 2.82 f
HT: HS 20% (80°C/30 min)	1532.5 ± 7.77 fg	794 ± 11.31 c	2197.5 ± 6.36 l
HT: HS 20% (100°C/30 min)	1522.5 ± 7.77 fg	762.5 ± 2.12 b	2147 ± 4.24 k
HT: HS 20% (130°C/30 min)	1335 ± 11.31 d	674 ± 7.07 d	1795 ± 4.24 h

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. Valores dentro del paréntesis indican temperatura y tiempo al que fueron tratadas las harinas sustitutorias. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

La viscosidad de ruptura no mostró diferencias significativas entre HT (823.5 ± 10.6) y la HT sustituida al 20% con HA tratada a 80 o 100°C durante 30 minutos (821 ± 9.89 o 825.5 ± 3.53) respectivamente, así como cuando la HT fue sustituida con HM al 10 o 20% tratadas a 130°C/30 min (836 ± 9.89 o 810 ± 9.89) respectivamente. En cambio cuando se utilizó HS en la sustitución, todas las mezclas obtenidas mostraron diferencias con respecto a HT, excepto cuando esta fue sustituida al 10% con HS tratada a 130°C (807.5 ± 3.53). La tendencia en estas últimas sustituciones fue de disminuir el valor de viscosidad de ruptura a medida que incremento el nivel de sustitución y la temperatura de tratamiento térmico, comportamiento contrario al observado cuando se utilizó HA en las sustituciones. El análisis de varianza mostró como los factores temperatura, % de sustitución y la interacción de ambos tuvieron influencia en la significancia estadística observada, el mismo caso que cuando se utilizó HA en la sustitución de HT.

Finalmente, la viscosidad de restitución mostró diferencias significativas entre HT (1238.5 ± 10.6) y las sustituciones realizadas con HA, HM o HS en los diferentes niveles y tratamientos térmicos. Sin embargo, cuando se utiliza HA (sin tratamiento térmico) al 10% en la sustitución (1239 ± 22.62), no se registraron diferencias con respecto a HT. Al utilizar HA o HM en las sustituciones no se observa un comportamiento regular, sin embargo, al utilizar HS si se observa la tendencia de disminuir a medida que se incrementó la temperatura de tratamiento. Este efecto fue presentado para los dos niveles de sustitución al que se usó HS. Al observar los análisis de varianza para la sustitución de HT por HA, HM o HS, se logró apreciar que la diferencia estadística estaba determinada por los factores de temperatura, % de sustitución, así como la interacción de ambos.

III.3.2 Análisis en masas

III.3.2.1 Capacidad fermentativa

Con la finalidad de evaluar la capacidad fermentativa de las harinas se midió la variación de volumen de la masa durante una hora de fermentación a 90%

de HR y 40°C. En las Figuras III.7, III.8 y III.9 se muestra la variación del volumen para las mezclas de las harinas tratadas térmicamente mediante graficas de superficie de respuesta, así como mediante líneas la harina HT y cada una de las sustituidas al 10% sin tratamiento térmico. Como se observa en la Figura III.7, en la que HT fue sustituida por HA tratada térmicamente, el tratamiento térmico fue muy influyente dado que generó un gran incremento en la capacidad fermentativa, siendo esta muy superior a la de HT: HA 10% sin tratamiento térmico (134 ± 4.03) y a la patrón HT (136.32 ± 4.62). La mayor subida de la masa se obtuvo cuando se aplicó una temperatura de 100°C tanto para una sustitución del 10% (160.13 ± 5.96) como del 20% (163.93 ± 4.11). Este comportamiento posiblemente esté relacionado con el aporte de β -glucanos de la avena, que aunque normalmente son utilizados como ingrediente en alimentos funcionales, también son utilizados para mejorar las propiedades visco elásticas de formulaciones de pan libre de gluten (Lazaridou y Biliaderis, 2007). Estudios realizados por Londono et al., (2015) mostraron como el contenido y viscosidad de β -glucanos afectan las propiedades tecnológicas de la masa de avena en un sistema libre de gluten y un sistema con gluten, encontrando que el aumento en la capacidad de retención de gas.

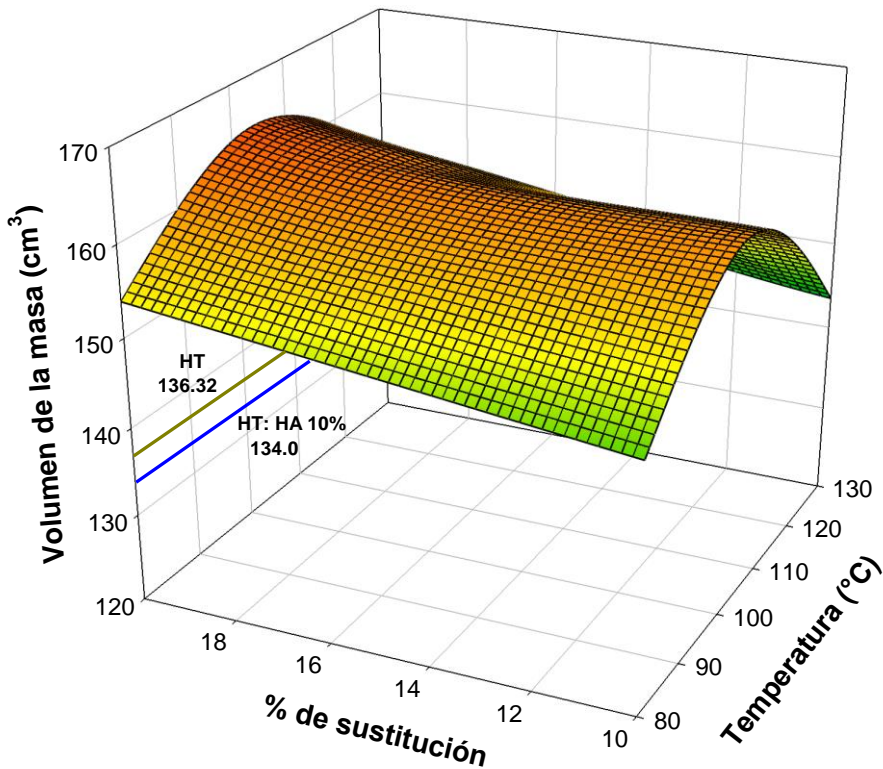


Figura III.7. Gráfico de superficie para los valores de volumen de la masa (cm^3) de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HA (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HA 10% (mezcla harina de trigo y harina de avena al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).

El tratamiento térmico a la HM también generó un gran cambio en su capacidad fermentativa cuando esta fue combinada con la harina HT. Como se puede observar en la Figura III.8, independientemente del grado de sustitución y de la intensidad del tratamiento térmico, se produjo un incremento en el volumen de la masa cuando se compara con el obtenido para la sustitución HT: HM al 10% sin tratamiento térmico (109.29 ± 1.68). En cambio solo se alcanzó el valor de la harina de referencia HT (136.32 ± 4.62) para la combinación de HT: HM al 10% que mostró su máxima capacidad fermentativa cuando HM fue tratada térmicamente a 130°C durante 30 minutos (135.89 ± 6.14). Este comportamiento puede estar relacionado con

lo observado en estudios desarrollados por Van Hung y Morita (2004), sobre propiedades de la masa y la calidad del pan de harinas suplementados con almidones de maíz reticulados, donde observaron que las harinas sustituidas con almidones de maíz con alto grado de hinchamiento generan una masa más fuerte con un volumen de pan mayor y una miga más blanda que al utilizar almidones de maíz de bajo grado de hinchamiento.

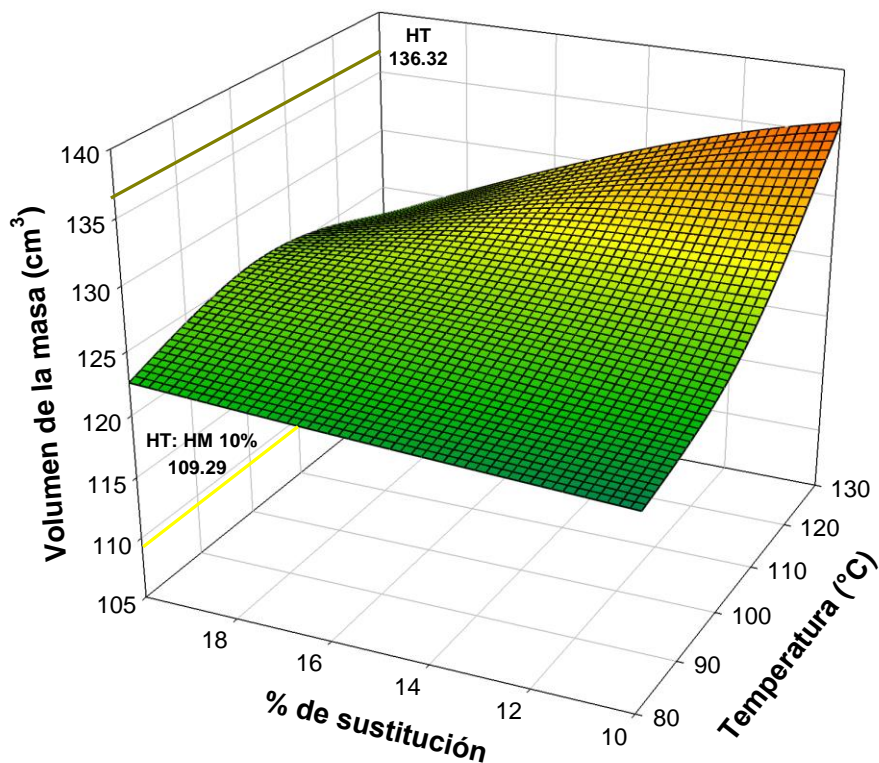


Figura III.8. Gráfico de superficie para los valores de volumen de la masa (cm³) de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HM (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HM 10% (mezcla harina de trigo y harina de maíz al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).

En lo que respecta a los resultados obtenidos cuando se utilizó HS en la sustitución de HT, estos se pueden observar en la Figura III.9. Como se aprecia, salvo para el tratamiento a 100°C que no produjo cambio de

volumen en comparación con la harina no tratada (HT: HS 10% = 112.62), para las otras dos temperaturas testadas si existió efecto del tratamiento térmico sobre la capacidad fermentativa, si bien este fue muy ligero cuando se aplicó 80°C. En cambio cuando la temperatura aplicada fue de 130°C se produjo un gran incremento en la capacidad fermentativa de la harina llegando incluso, en el caso de la sustitución al 10%, a valores (137.32 ± 6.37) similares a los de la harina HT. Este comportamiento puede estar relacionados con estudios realizados por Marston et al., (2016), donde observaron efectos positivos en harinas de sorgo utilizadas para elaborar pastel, las cuales fueron tratadas térmicamente, aumentando la viscosidad de la masa mientras se producía una disminución en la gravedad específica de la misma, haciendo que más burbujas de aire quedaran atrapadas en la masa. Además de generar una masa más fuerte, que ayudó a prevenir la coalescencia de las celdas de gas y el colapso durante el enfriamiento, mejoró la resistencia estructural y el volumen del pastel, que ésta relacionado directamente con el volumen de la masa durante la fermentación.

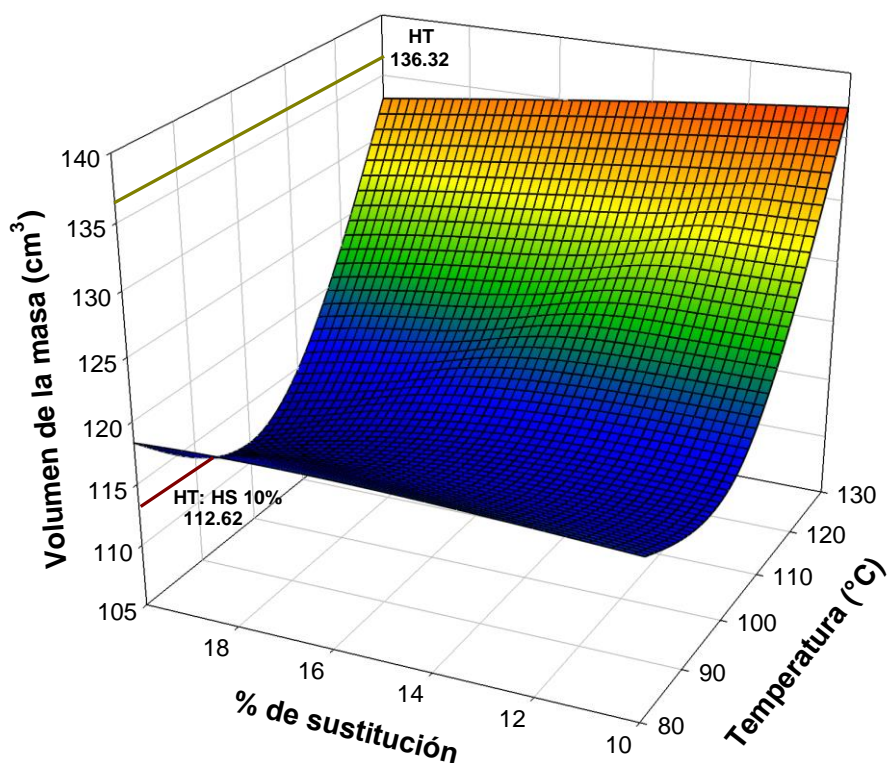


Figura III.9. Gráfico de superficie para los valores de volumen de la masa (cm^3) de la harina HT sustituida al 10 o 20% con HS (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min). — HT: HS 10% (mezcla harina de trigo y harina de sorgo al 10% sin tratamiento térmico); — HT (harina de trigo).

III. 3.3 Análisis en pan

III.3.3.1 Pérdida de peso durante el horneado

Los resultados de pérdida de peso durante el horneado se pueden observar en la Figura III.10. Al analizar los resultados se observó un efecto significativo del tratamiento térmico sobre la pérdida de peso dado que en todos los casos los panes elaborados con harinas tratadas térmicamente tuvieron una menor pérdida de peso que sus correspondientes elaborados con un 10% de harina

de sustitución no tratada térmicamente (líneas azul, amarillo y roja correspondientes a las sustituciones con HA, HM y HS respectivamente). Además, el estudio de los panes elaborados con diferente nivel de sustitución (10 y 20%) de harina HA, tratada a diferentes intensidades térmicas (80, 100 y 130°C), mostró como al aumentar la intensidad disminuyeron las pérdidas de peso, llegando a alcanzar la pérdida de peso de los panes elaborados con la harina patrón HT (-12.50 ± 0.36) para los tratamientos a 130°C. De igual forma, los panes elaborados con un 10 y 20% de harina HS tratada a 130°C y los panes elaborados con harina HM, también tratada a 130°C tuvieron una pérdida de peso igual a la de los panes HT. La desnaturalización de proteínas y la parcial gelatinización de los gránulos de almidón que se da cuando a las harinas se les aplican tratamientos térmicos podría ser la causa de lo observado (Neill et al., 2012). Estudios realizados por Magee y Neill (2012), observaron que tratamientos térmicos altos aumentaron la capacidad de los gránulos de almidón para absorber más agua, así como la desnaturalización de las proteínas que pudieron haber contribuido al incremento en el nivel de viscosidad. Por otro lado, proteínas localizadas en la superficie del almidón, como lo son albúminas y globulinas, se podrían haber modificado por el tratamiento térmico permitiendo que los gránulos de almidón absorbieran más agua.

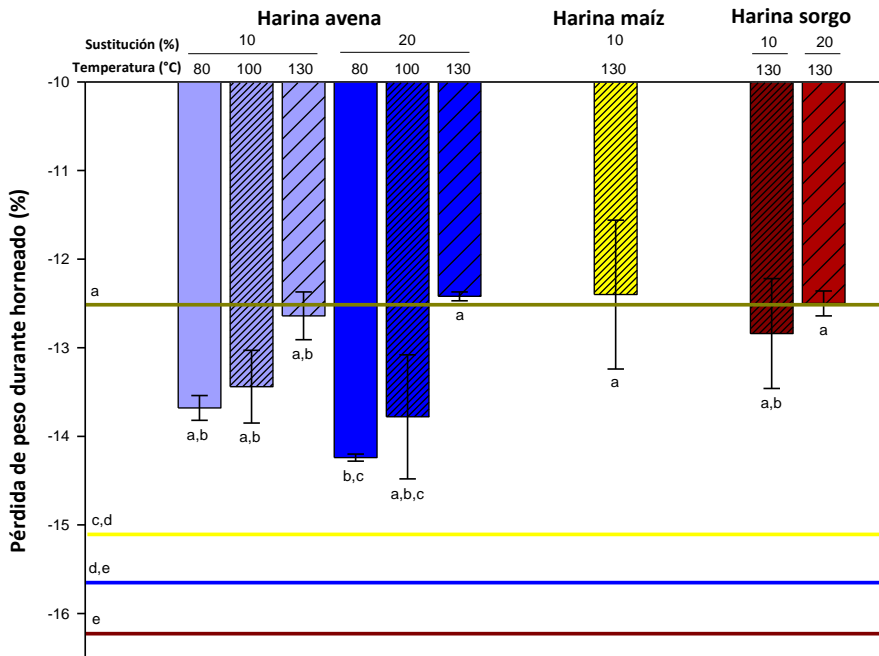


Figura III.10. Pérdida de peso durante el horneado de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. — HT: HA 10%; — HT: HM 10%; — HT: HS 10%; — HT, todas ellas sin tratamiento térmico.

III.3.3.2 Análisis de envejecimiento

El envejecimiento del pan es relacionado con los cambios indeseables que se presentan (además de la contaminación microbiana) entre el tiempo que pasa desde que fue elaborado hasta que es consumido. Con la finalidad de evaluar la estabilidad del pan durante el periodo de consumo se procedió al análisis del envejecimiento a partir de la evaluación de los parámetros de textura, variación de peso y actividad de agua a los 0, 2 y 7 días. Dado que para las harinas no tratadas térmicamente no se realizó estudio de envejecimiento (datos capítulo 2), en las figuras siguientes solo se presentan valores para los panes elaborados al día 0. El pan obtenido solo con harina

de trigo si fue analizado durante los días 0, 2 y 7 de envejecimiento a los que se sometieron los panes obtenidos de harinas tratadas térmicamente.

III.3.3.2.1 Evaluación de la textura (Texture Profile Analysis (TPA))

En las Figuras III.11, III.12 y III.13 se muestran los resultados de los parámetros de textura: dureza (N), gomosidad y masticabilidad respectivamente, mientras que en la Tabla III.4, los de elasticidad, cohesividad y resiliencia.

El análisis de los datos de dureza de los panes elaborados con harina HA, como sustitutoria, mostró como a día 0 independientemente del tratamiento térmico, y del grado de sustitución, los valores fueron inferiores a los obtenidos por los panes control ($HT=6.25 \pm 0.54$). Comparando entre los panes con y sin tratamiento térmico (línea azul) con un grado de sustitución del 10% se evidenció un ligero descenso en los valores, con el incremento de la intensidad del tratamiento. En cambio cuando la sustitución fue del 20%, la tendencia fue inversa, incrementándose los valores de dureza con el incremento del tratamiento térmico. Este comportamiento observado, tanto en el grado de sustitución (10 o 20%) como en la intensidad del tratamiento térmico, fue mucho más acentuado cuanto mayor fue el tiempo de envejecimiento (2 y 7 días), si bien tanto a los 2 días como a los 7 los panes con HA al 10% y tratada a 130°C fueron los que presentaron un menor valor de dureza en comparación con el resto de panes (9.77 ± 2.63 y 13.92 ± 2.68 , respectivamente), incluso a los panes elaborados solo de HT en los mismos días de envejecimiento. En el caso de la sustitución con HM al 10%, a día 0 el tratamiento térmico sí influyó sobre los valores de dureza, incrementándose estos (6.69 ± 0.69) con respecto a los no tratados (línea amarilla; 5.64 ± 0.83), alcanzando valores similares a los de HT. Con el transcurso del tiempo de envejecimiento los valores de dureza aumentaron, siendo de los más elevados a los 2 días (19.67 ± 1.98) pero no tanto como a los 7 (23.06 ± 2.28), estos valores mencionados anteriormente llegaron a ser más altos todavía que los obtenidos por el pan elaborado solo de HT (17.39 ± 1.28 o 19.45 ± 0.81 , 2 y 7 días de envejecimiento, respectivamente). En

cuanto a la sustitución con harina HS, el tratamiento térmico influyó cuando la harina fue sustituida en un 10% y tratada a 130°C, produciéndose un descenso de la dureza (6.89 ± 0.60) con respecto al mismo grado de sustitución pero sin tratamiento térmico (línea roja; 10.51 ± 1.56), alcanzándose valores similares a los panes elaborados con HT. En cambio cuando fue sustituida con un 20% de harina tratada a 130°C se produjo un incremento, aumentado el valor de dureza (12.85 ± 0.24), el cual siguió subiendo, al igual que para la sustitución al 10%, durante el envejecimiento, llegando a ser la sustitución al 20% la que presentó el máximo valor a los 7 días (30.92 ± 2.03) en comparación con el resto de los panes.

La firmeza de la miga es causada por cambios en la estructura del almidón. El almidón en las harinas ésta formado por cadenas rectas (amilosa) y ramificadas (amilopectina) que están contenidas en los gránulos. Durante la cocción los gránulos se hinchan y las cadenas lineales se difunden fuera del gránulo de forma que cuando el pan se enfría las cadenas lineales se juntan proveyendo dureza y dando forma al pan. En cambio las cadenas ramificadas del almidón permanecen dentro del gránulo durante el horneado y se van juntando lentamente durante el almacenamiento, haciendo que la miga se vaya haciendo más firme con el paso del tiempo. Estudios realizados por López y Goldner, (2015) también observaron este incremento en firmeza cuando analizaron la Influencia del tiempo de almacenamiento para la aceptabilidad de pan formulado con aislado de proteína de altramuza cuando fue medida a las 2, 24, 48 y 72 horas. Estudios realizados por Verdú et al., (2015) también observaron este mismo comportamiento al utilizar chíca al 10, 15 o 20% en la sustitución de HT a los 0, 1, 3 o 7 días de envejecimiento.

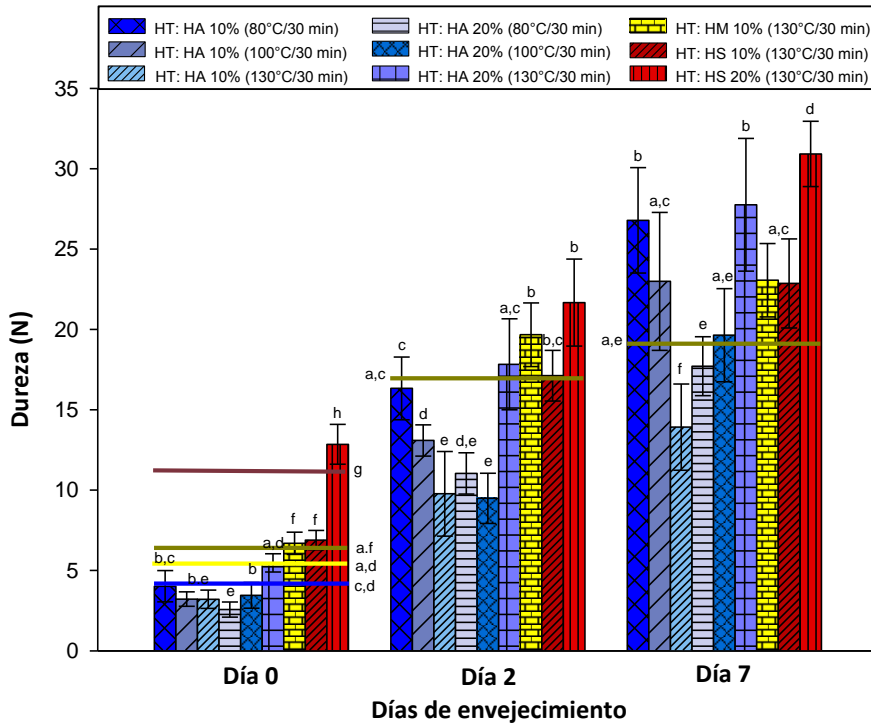


Figura III.11. Resultados de dureza (N) de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. — HT: HA 10%; — HT: HM 10%; — HT: HS 10%; — HT, todas ellas sin tratamiento térmico.

Los datos del parámetro gomosidad a día 0 para los panes obtenidos de las mezclas HT: HA al 10% o 20% tratada a 80, 100 o 130°C durante 30 min evidenciaron un efecto marcado del tratamiento térmico con respecto al obtenido de HT: HA al 10% sin tratamiento térmico (4.03 ± 0.85), obteniéndose menores valores a excepción de las sustituidas al 20% y tratadas a 130°C que presentaron valores similares (4.59 ± 0.47), si bien ninguno de los panes alcanzó el valor de los panes elaborados con HT (5.04 ± 0.40). El efecto del incremento del tratamiento térmico mostró como para los panes con un grado de sustitución del 10% produce un ligero descenso de la gomosidad, para la sustitución del 20% generó un incremento de dicho valor. Esta tendencia al igual que para el parámetro de dureza fue más

acusado con el incremento del tiempo de envejecimiento. Cuando la sustitución fue realizada por HM al 10% tratada a 130°C no se evidenció efecto del tratamiento térmico, obteniéndose el mismo valor que sin éste y similar al de los panes elaborados con HT. Con el incremento del tiempo de envejecimiento los valores de gomosidad aumentaron, siendo de los más elevados a los 2 días (11.11 ± 1.79) pero no así a los 7 (11.17 ± 0.70), valores muy semejantes a los obtenidos por el pan de HT a los mismos días de envejecimiento (10.37 ± 0.74 o 10.46 ± 0.36). En cuanto a la sustitución con harina HS, el tratamiento térmico influyó cuando la harina fue sustituida en un 10% y tratada a 130°C, produciéndose un descenso de la gomosidad (5.44 ± 0.49) con respecto al mismo grado de sustitución pero sin tratamiento térmico (línea roja; 8.29 ± 1.11), alcanzándose valores similares a los panes elaborados con HT. En cambio cuando fue sustituida con un 20% de harina tratada a 130°C se produjo un incremento, aumentado el valor de gomosidad (8.90 ± 0.74), el cual siguió aumentando, al igual que para la sustitución al 10%, durante el envejecimiento (valores mayores a los obtenidos del pan elaborado solo de HT), llegando a ser la sustitución al 20% la que presentó el máximo valor a los 7 días (13.74 ± 1.71) junto con los panes elaborados con HA al 10% y tratada a 80°C (13.80 ± 1.70) y al 20% tratadas a 130°C (14.58 ± 1.99).

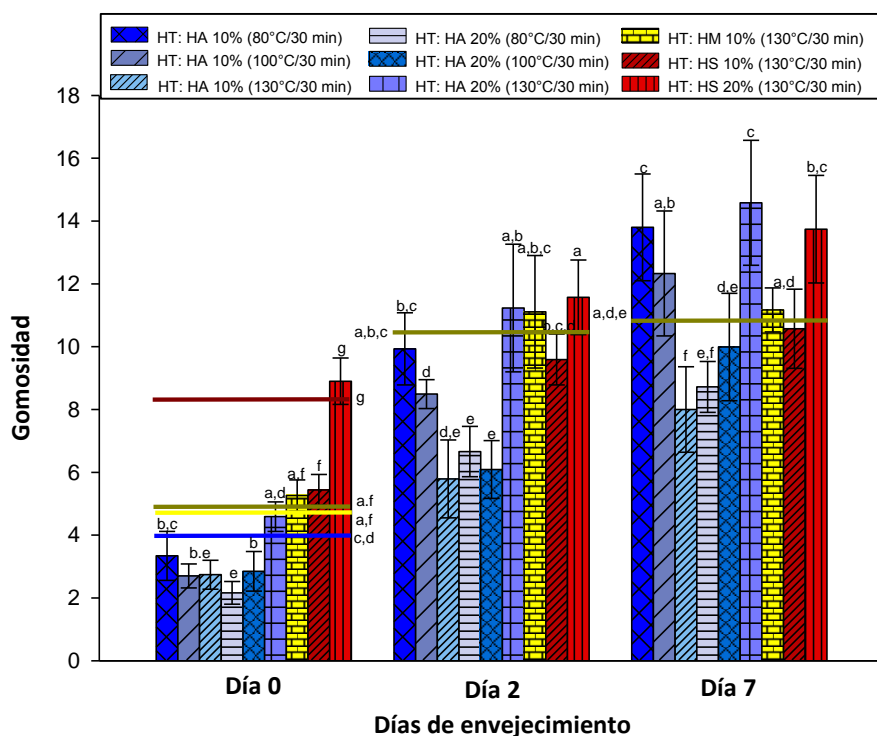


Figura III.12. Resultados de gomosidad de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. — HT: HA 10%; — HT: HM 10%; — HT: HS 10%; — HT, todas ellas sin tratamiento térmico.

Otro de los parámetros analizados fue masticabilidad. Al día 0, se observa que el pan obtenido de la mezcla HT: HA al 10% tratada a 80°C durante 30 min no mostró diferencias con respecto al obtenido de HT: HA al 10% sin tratamiento térmico (3.74 ± 0.96), pero si con respecto al pan elaborado solo de HT (4.76 ± 0.57). Al aumentar la sustitución al 20% con HA se observa un incremento en este parámetro al tratar la harina a 130°C (4.53 ± 0.45) incluso igualando al de HT y al obtenido de la mezcla de HT: HM al 10% (4.62 ± 0.76) sin tratamiento térmico. En este mismo caso se encuentran las sustituciones de HT con HM o HS al 10% tratadas a 130°C (5.15 ± 0.48 o 5.24 ± 0.57), respectivamente. La sustitución de HT con HS al 20% tratada a 130°C elevó

el valor de este parámetro (8.20 ± 0.70) logrando igualar significativamente al obtenido de HT: HS al 10% sin tratamiento térmico (8.08 ± 1.17). Al igual que gomosidad, la aplicación de temperatura (130°C) sobre las harinas sustitutorias de HA utilizada al 20% y la de HM o HS al 10% favoreció este parámetro para ubicarlo igual al obtenido del pan control (HT). Al día 2, los incrementos en este parámetro empiezan a ser evidentes. Los más relevantes fueron dados cuando la HT fue sustituida por HA al 10% tratada a 80°C (9.36 ± 1.07), HA al 20% tratada a 130°C (10.55 ± 1.88), HM al 10% tratada a 130°C (9.71 ± 0.79), HS al 20% tratadas a 100 o 130°C (8.62 ± 1.18 o 10.0 ± 1.11), valores muy semejantes al obtenido del pan elaborado solo de HT (9.71 ± 0.76). La utilización de tratamientos térmicos elevados (130°C) en las harinas sustitutorias generó un incremento en este parámetro, más específicamente cuando se utilizó en la sustitución el 20% de HA o HS. Además cuando se utilizó HM al 10%, este mismo comportamiento fue observado en gomosidad. A día 7, al igual que gomosidad se siguen observando incrementos en los panes elaborados con las diferentes mezclas con respecto al pan control (HT), sin embargo, las mezclas de HT: HA al 10% tratadas a 80 o 100°C (12.83 ± 1.54 o 11.47 ± 1.86) destacaron por el aumento observado en este parámetro. Este mismo comportamiento fue mostrado por los panes obtenidos de las mezclas HT: HA o HS al 20% tratadas a 130°C (12.92 ± 2.35 o 11.20 ± 1.55). Las mezclas de HT: HM o HS al 10% tratadas a 130°C (10.20 ± 0.67 o 9.41 ± 1.41) mostraron valores muy semejantes a los obtenidos a día 2 de envejecimiento.

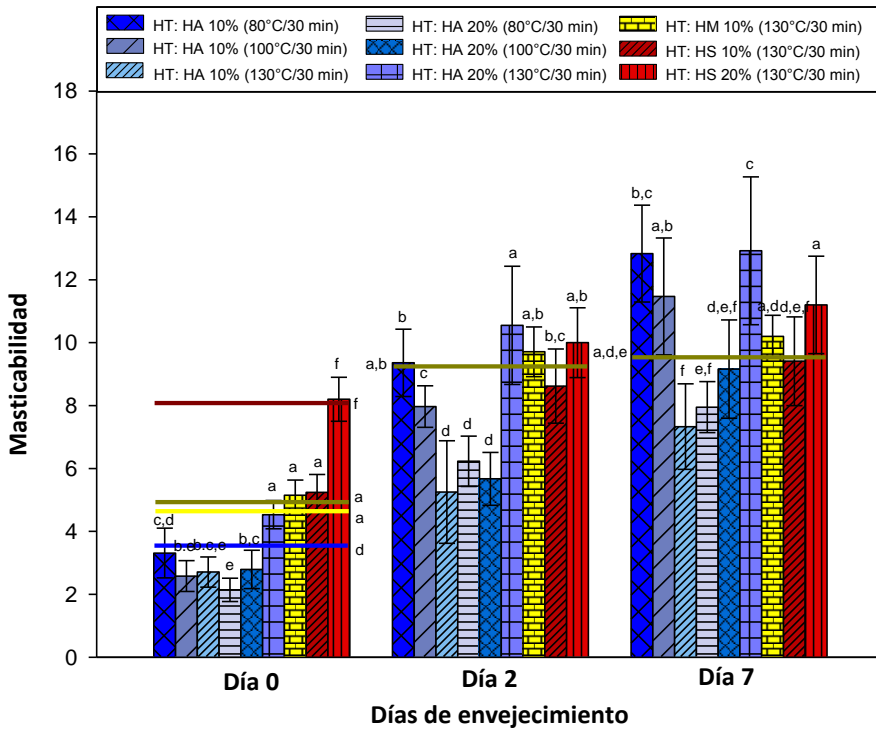


Figura III.13. Resultados de masticabilidad de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. — HT: HA 10%; — HT: HM 10%; — HT: HS 10%; — HT, todas ellas sin tratamiento térmico.

Además de los parámetros comentados, en el análisis de textura también se analizaron la elasticidad, cohesividad y resiliencia. La Tabla III.4 muestra los resultados de estos parámetros. Al analizar la elasticidad, la mayoría de los panes no mostraron diferencias entre aquellos elaborados con las diferentes mezclas tratadas térmicamente y el elaborado solo con HT al día 0, 2 o 7 de medición, a excepción de cuando se utilizó HT: HM al 10% tratada a 130°C (0.88 ± 0.09) y al utilizar HT: HS al 20% tratada a 130°C medidas a los días 2 y a los 7 de la prueba (0.87 ± 0.02 o 0.82 ± 0.10 , respectivamente). Así, ni el tiempo de envejecimiento, los niveles de sustitución, tipo de cereal y los diferentes tratamientos térmicos a los que fueron sometidas las harinas

sustitutorias influyeron sobre este parámetro salvo las excepciones comentadas anteriormente.

En lo que respecta a cohesividad, la tendencia en esta medición fue de disminuir a medida que se incrementó el tiempo de envejecimiento, lo cual fue más evidente a día 7. Los valores de cohesividad a día 0 obtenidos del pan elaborado solo de HT fue de 0.81 ± 0.01 , mientras que el resto de las mezclas están englobadas dentro del rango de 0.69 a 0.86, siendo el valor más bajo generado por la mezcla HT: HS al 20% tratada a 130°C y el valor mayor por la mezcla de HT: HM al 10% sin tratamiento térmico, mostrando ambas diferencias significativas con respecto a HT. A día 2 de envejecimiento este parámetro disminuyó a los rangos de 0.54 a 0.65, mientras que a día 7 lo hizo a 0.44 a 0.57. Los valores mostrados a la baja son generados por la misma mezcla que a día 0 de medición, mientras que los que alcanzaron valores mayores a día 2 o 7 fueron los panes elaborados con las mezclas de HT: HA al 10% tratada a 100°C y la mezcla de HT: HA al 10% tratada a 130°C . Todas ellas manteniendo diferencias con los valores obtenidos con el pan control (HT). Finalmente el parámetro de resiliencia al igual que en la cohesividad, al incrementar los días de envejecimiento los valores de este parámetro disminuyeron. Los rangos obtenidos para este parámetro a día 0 fueron de 0.33 a 0.46. El valor más bajo observado fue para el pan obtenido de la mezcla HT: HS al 20% tratada a 130°C , mientras que para el más alto fue para las mezclas de HT: HA o HM al 10% sin tratamiento térmico, además de para la mezcla HT: HA al 10% tratada a 130°C y el obtenido por el pan elaborado solo de HT, los cuales no mostraron diferencias significativas entre ellos. Para el día 2, el rango fue de 0.23 a 0.33, el valor más bajo, al igual que a día 0 fue observado en el pan generado de la mezcla HT: HS al 20% tratada a 130°C , mientras que el valor mayor fue generado por la mezcla HT: HA al 10% tratada a 100°C . A día 7, la disminución de estos valores continúa hasta llegar al rango de 0.19 a 0.27, observándose el valor menor en la misma mezcla que en los días 0 y 2, y el valor mayor para la mezcla HT: HA al 10% tratada a 130°C . El tratamiento térmico que más efecto tuvo para este parámetro fue cuando se utilizó la mezcla HT: HS al 20% tratada a 130°C .

Tabla III.4. Resultados de elasticidad, cohesividad y resiliencia de los panes elaborados con harina HT sustituida al 10 y 20% por HA tratada térmicamente a 80, 100 y 130°C, por HM al 10% tratada a 130°C y por HS al 10 y 20% de sustitución tratada a 130°C. HT: HA 10%; HT: HM 10%; HT: HS 10%; HT, todas ellas sin tratamiento térmico.

<i>Pan</i>	<i>Día</i>	<i>Elasticidad</i>	<i>Cohesividad</i>	<i>Resiliencia</i>
HT	0	0.94 ± 0.05 abc	0.81 ± 0.01 ac	0.46 ± 0.01 af
	2	0.94 ± 0.01 a	0.60 ± 0.01 ade	0.26 ± 0.01 acd
	7	0.93 ± 0.01 a	0.54 ± 0.02 ac	0.24 ± 0.02 ab
HT: HA 10% <i>HT: HA 10% (80°C/30 min)</i>	0	0.93 ± 0.11 ab	0.84 ± 0.01 de	0.46 ± 0.02 af
	0	0.99 ± 0.02 a	0.83 ± 0.01 cd	0.43 ± 0.01 c
	2	0.94 ± 0.02 a	0.61 ± 0.02 abd	0.30 ± 0.02 ac
	7	0.93 ± 0.01 a	0.52 ± 0.01 acd	0.25 ± 0.01 bc
<i>HT: HA 10% (100°C/30 min)</i>	0	0.96 ± 0.09 abc	0.84 ± 0.01 de	0.44 ± 0.02 ad
	2	0.94 ± 0.04 a	0.65 ± 0.03 c	0.33 ± 0.02 b
	7	0.93 ± 0.01 a	0.54 ± 0.03 a	0.26 ± 0.02 ab
<i>HT: HA 10% (130°C/30 min)</i>	0	0.99 ± 0.02 c	0.85 ± 0.01 ef	0.46 ± 0.01 af
	2	0.91 ± 0.11 ab	0.60 ± 0.04 abde	0.29 ± 0.03 cd
	7	0.89 ± 0.03 a	0.57 ± 0.03 b	0.27 ± 0.01 a
<i>HT: HA 20% (80°C/30 min)</i>	0	0.99 ± 0.02 c	0.84 ± 0.01 de	0.40 ± 0.02 b
	2	0.93 ± 0.01 a	0.60 ± 0.02 abde	0.29 ± 0.01 cd
	7	0.91 ± 0.01 a	0.49 ± 0.02 def	0.22 ± 0.01 d
<i>HT: HA 20% (100°C/30 min)</i>	0	0.98 ± 0.02 c	0.83 ± 0.01 cd	0.41 ± 0.01 b
	2	0.93 ± 0.02 a	0.64 ± 0.03 bc	0.30 ± 0.01 ac
	7	0.92 ± 0.02 a	0.51 ± 0.02 cde	0.23 ± 0.01 cd
<i>HT: HA 20% (130°C/30 min)</i>	0	0.99 ± 0.02 c	0.84 ± 0.01 de	0.44 ± 0.01 ad
	2	0.94 ± 0.01 a	0.63 ± 0.06 bc	0.31 ± 0.03 a
	7	0.89 ± 0.13 a	0.53 ± 0.04 ac	0.26 ± 0.03 ab
HT: HM 10% <i>HT: HM 10% (130°C/30 min)</i>	0	0.96 ± 0.05 abc	0.86 ± 0.05 f	0.46 ± 0.01 af
	0	0.98 ± 0.03 c	0.79 ± 0.01 a	0.43 ± 0.01 cd
	2	0.88 ± 0.09 b	0.57 ± 0.03 def	0.27 ± 0.02 de
	7	0.92 ± 0.01 a	0.48 ± 0.02 ef	0.22 ± 0.01 de
HT: HS 10% <i>HT: HS 10% (130°C/30 min)</i>	0	0.97 ± 0.03 bc	0.79 ± 0.01 a	0.43 ± 0.01 cd
	0	0.96 ± 0.02 abc	0.79 ± 0.05 a	0.42 ± 0.01 c
	2	0.90 ± 0.06 ab	0.56 ± 0.03 ef	0.25 ± 0.02 e
	7	0.89 ± 0.05 ab	0.46 ± 0.01 fg	0.20 ± 0.01 ef
<i>HT: HS 20% (130°C/30 min)</i>	0	0.92 ± 0.01 a	0.69 ± 0.01 b	0.33 ± 0.01 e
	2	0.87 ± 0.02 b	0.54 ± 0.03 f	0.23 ± 0.01 f
	7	0.82 ± 0.10 b	0.44 ± 0.04 g	0.19 ± 0.03 f

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. Valores dentro del paréntesis indican temperatura y tiempo al que fueron tratadas las harinas sustitutorias. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

III.3.3.2.2 Variación de peso

En la tabla III.5 se muestra los resultados obtenidos para la variación de peso (expresado en porcentaje) a los 2 y 7 días de almacenamiento. Como puede observarse, no se aprecia una incidencia directa del grado de sustitución y del tratamiento térmico sobre la pérdida de peso. Todos los panes tuvieron una pérdida de peso estadísticamente significativa entre los días 2 y 7. A los 2 días, todos los panes presentaron valores similares a los obtenidos empleando la harina patrón HT (-0.048 ± 0.003). A los 7 días, tampoco se observaron diferencias significativas entre los panes, a excepción de los panes elaborados con la harina HT: HA 20% tratada a 130°C, que presentó valores (-0.117 ± 0.009) estadísticamente menores a los obtenidos por los panes elaborados con la harina patrón HT (-0.157 ± 0.001). Así pues no se observó una incidencia directa del grado de sustitución y del tratamiento térmico.

Tabla III.5. Variación de peso del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA al 10 o 20% (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min), HM al 10% o HS al 10 o 20% (tratadas a 130°C/30 min) durante el estudio de envejecimiento.

<i>Pan</i>	<i>Variación de peso (%)</i>	
	<i>Día 2</i>	<i>Día 7</i>
HT	-0.048 ± 0.003 a	-0.157 ± 0.001 b
<i>HT: HA 10% (80°C/30 min)</i>	-0.053 ± 0.003 a	-0.144 ± 0.006 bc
<i>HT: HA 10% (100°C/30 min)</i>	-0.053 ± 0.003 a	-0.139 ± 0.007 bc
<i>HT: HA 10% (130°C/30 min)</i>	-0.041 ± 0.000 a	-0.142 ± 0.001 bc
<i>HT: HA 20% (80°C/30 min)</i>	-0.047 ± 0.000 a	-0.121 ± 0.000 bc
<i>HT: HA 20% (100°C/30 min)</i>	-0.044 ± 0.003 a	-0.122 ± 0.016 bc
<i>HT: HA 20% (130°C/30 min)</i>	-0.043 ± 0.003 b	-0.117 ± 0.009 c
<i>HT: HM 10% (130°C/30 min)</i>	-0.055 ± 0.001 a	-0.155 ± 0.001 b
<i>HT: HS 10% (130°C/30 min)</i>	-0.041 ± 0.007 a	-0.158 ± 0.003 b
<i>HT: HS 20% (130°C/30 min)</i>	-0.055 ± 0.001 a	-0.128 ± 0.001 bc

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. Valores dentro del paréntesis indican temperatura y tiempo al que fueron tratadas las harinas sustitutorias. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

III.3.3.2.3 Actividad de agua (a_w)

La tabla III.6 muestra los valores de a_w para los panes durante el estudio de envejecimiento. Como puede observarse todos los panes presentaron un descenso de la a_w con el tiempo como consecuencia de la deshidratación ya observada en el estudio de la variación de masa (Tabla III.4). Al observar los resultados para día 0 se obtuvieron diferencias significativas entre el pan elaborado solo de HT (0.958 ± 0.001) y los obtenidos cuando la HT fue sustituida al 10% de HA tratada a 130°C (0.962 ± 0.001), además de los panes obtenidos de las mezclas de HT con HA al 20% tratadas a temperaturas de 80 o 100°C, (0.953 ± 0.002 o 0.952 ± 0.003 , respectivamente). El efecto de la intensidad del tratamiento térmico fue notorio dado que los incrementos en

esta medición se obtuvieron cuando las harinas sustitutorias se sometieron a tratamientos térmicos de 130°C. Con respecto al día 2 no se observaron diferencias significativas entre los panes obtenidos de las diferentes mezclas de harinas y HT (0.954 ± 0.002). Finalmente para el día 7, solamente se observaron diferencias con HT (0.948 ± 0.002) cuando la HT fue sustituida con HA al 20% sometida a tratamiento térmico de 80°C durante 30 min (0.934 ± 0.011).

Tabla III.6. Actividad de agua de la miga del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA, HM o HS al 10 o 20% (tratadas a 80, 100 o 130°C durante 30 minutos), así como de HT y de HT: HA, HT: HM y HT: HS al 10% sin tratamiento térmico.

Pan	Actividad de agua (a_w)		
	Día 0	Día 2	Día 7
HT	0.958 ± 0.001 acd	0.954 ± 0.002 ab	0.948 ± 0.002 ab
HT: HA 10%	0.958 ± 0.001 acd	----	----
HT: HA 10% (80°C/30 min)	0.957 ± 0.004 acd	0.956 ± 0.002 a	0.948 ± 0.002 ab
HT: HA 10% (100°C/30 min)	0.959 ± 0.001 de	0.951 ± 0.003 b	0.942 ± 0.007 abc
HT: HA 10% (130°C/30 min)	0.962 ± 0.001 e	0.953 ± 0.002 ab	0.946 ± 0.006 ab
HT: HA 20% (80°C/30 min)	0.953 ± 0.002 b	0.955 ± 0.001 ab	0.934 ± 0.011 c
HT: HA 20% (100°C/30 min)	0.952 ± 0.003 b	0.953 ± 0.004 ab	0.948 ± 0.001 ab
HT: HA 20% (130°C/30 min)	0.955 ± 0.002 bc	0.956 ± 0.001 a	0.941 ± 0.007 abc
HT: HM 10%	0.955 ± 0.004 bc	----	----
HT: HM 10% (130°C/30 min)	0.959 ± 0.003 de	0.952 ± 0.004 ab	0.951 ± 0.001 a
HT: HS 10%	0.959 ± .002 de	----	----
HT: HS 10% (130°C/30 min)	0.960 ± 0.001 de	0.956 ± 0.004 a	0.948 ± 0.006 ab
HT: HS 20% (130°C/30 min)	0.958 ± 0.001 acd	0.953 ± 0.002 ab	0.939 ± 0.006 bc

HT, Harina trigo; HA, Harina avena; HM, Harina maíz; HS, Harina sorgo. Valores dentro del paréntesis indican temperatura y tiempo al que fueron tratadas las harinas sustitutorias. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

III.3.4 Análisis sensorial

En la Tabla III.7 se muestran los resultados de las catas para cada uno de los panes testados y parámetros evaluados. Como en el capítulo anterior, en

color verde se muestran aquellos panes cuyo valor no fue estadísticamente diferente del obtenido para los panes elaborados solo con HT. En azul se muestran aquellos parámetros para panes elaborados con harina sustituida parcialmente por HA, en amarillo sustituida por HM y en anaranjado sustituida por HS, pero en este caso con diferencias estadísticas con los panes elaborados con HT.

En el caso de los panes elaborados con la sustitución parcial con HA, solo aquel elaborado con un nivel de sustitución del 10% y tratada a 100°C presentó diferencias estadísticas en aroma con respecto al pan elaborado solo de HT, mientras que al incrementar el nivel de sustitución a 20% tratada térmicamente a 130°C presentaron valores estadísticamente inferiores a los obtenidos por los panes de HT en los parámetros de color, textura al tacto, apariencia, sabor y apreciación general. El resto de los panes tuvo una valoración similar a los HT no mostrando influencia ni del grado de sustitución ni de la intensidad del tratamiento térmico, con lo que utilizando un tratamiento térmico de 100°C durante 30 minutos se podría realizar la sustitución del trigo por avena a un nivel de 20% sin que los catadores evidenciaran diferencias.

Para los panes con sustitución por harina de maíz tratada térmicamente a un nivel de sustitución del 10 % y con tratamiento térmico a 130°C, si bien presentaron valores estadísticamente inferiores para la textura al tacto también los presentaron superiores para la textura en boca, no evidenciándose diferencia con HT en la apreciación general. En base a este resultado se podría afirmar que el tratamiento térmico no tiene influencia, pero como se observó en el estudio de la capacidad fermentativa (Figura III.8) este mejoró muchísimo con el tratamiento térmico de la harina llegando a valores de la harina HT.

Finalmente para los panes sustituidos con HS, si bien el tratamiento térmico a 130°C durante 30 minutos, para un nivel de sustitución del 10%, mejoró los valores de apreciación general respecto a los mismos panes llegando a no observarse diferencias significativas con los panes HT, su baja capacidad fermentativa (Figura III.4) lo haría no apropiado. En el caso de los HT: HS 20%

(130°C/30 minutos) las diferencias fueron muy evidentes, apreciándose diferencias significativas para todos los parámetros a excepción de textura en boca, no mejorando en ninguna medida lo observado para los panes elaborados con esta harina al 10%.

Tabla III.7. Resultados de la cata del pan elaborado con HT y de HT sustituida con HA al 10 o 20% (tratada a 80, 100 o 130°C/30 min), HM al 10% o HS al 10 o 20% (tratadas a 130°C/30 min).

Pan	Color	Aroma	Textura tacto	Apariencia	Sabor	Textura boca	Apreciación general
HT	6.48 ± 1.39 a	5.81 ± 1.59 bc	6.12 ± 1.37 ab	6.47 ± 1.28 ab	5.78 ± 1.59 ab	4.47 ± 1.85 bc	6.08 ± 1.34 abc
HT: HA 10% (80°C/30 min)	6.46 ± 1.35 a	6.25 ± 1.46 ab	6.11 ± 1.48 abc	6.71 ± 1.36 a	6.20 ± 1.35 ab	4.94 ± 1.97 abc	6.41 ± 1.18 ab
HT: HA 10% (100°C/30 min)	6.57 ± 1.29 a	6.61 ± 1.39 a	6.73 ± 1.26 a	6.70 ± 1.31 a	6.30 ± 1.34 a	5.10 ± 2.07 abc	6.61 ± 1.21 a
HT: HA 10% (130°C/30 min)	5.84 ± 1.63 ab	5.97 ± 1.43 abc	5.88 ± 1.34 bc	6.07 ± 1.51 abc	5.69 ± 1.40 ab	4.49 ± 1.84 abc	5.69 ± 1.26 bc
HT: HA 20% (80°C/30 min)	5.87 ± 1.17 ab	5.56 ± 1.32 bc	5.92 ± 1.49 abc	5.95 ± 1.31 abc	5.70 ± 1.12 ab	4.35 ± 2.02 bc	5.77 ± 0.93 bc
HT: HA 20% (100°C/30 min)	5.90 ± 0.96 ab	5.69 ± 1.25 bc	5.84 ± 1.20 bc	6.58 ± 0.81 ab	5.86 ± 1.33 ab	5.37 ± 1.23 ab	6.20 ± 0.85 abc
HT: HA 20% (130°C/30 min)	4.97 ± 1.31 cd	5.15 ± 1.41 cd	5.01 ± 1.11 de	5.34 ± 1.45 cd	4.57 ± 1.46 cd	4.31 ± 1.66 bc	4.59 ± 1.48 d
HT: HM 10% (130°C/30 min)	6.57 ± 1.16 a	6.03 ± 1.51 ab	5.31 ± 1.64 cd	6.47 ± 1.13 ab	5.57 ± 1.58 ab	5.49 ± 1.45 a	5.88 ± 1.03 abc
HT: HS 10% (130°C/30 min)	5.42 ± 1.68 bc	5.49 ± 1.84 bc	5.38 ± 1.71 cd	5.90 ± 1.75 bc	5.40 ± 1.82 bc	4.61 ± 2.29 abc	5.50 ± 1.72 c
HT: HS 20% (130°C/30 min)	4.46 ± 1.77 d	4.33 ± 1.43 d	4.37 ± 1.51 e	4.80 ± 1.55 d	4.20 ± 1.55 d	5.20 ± 1.69 abc	4.66 ± 1.55 d

HT ●, Harina trigo; HA ●, Harina avena; HM ●, Harina maíz; HS ●, Harina sorgo. Valores dentro del paréntesis indican temperatura y tiempo al que fueron tratadas las harinas sustitutorias. Medias con la misma letra dentro de la columna no son diferentes significativamente $p < 0.05$.

CONCLUSIONES

La realización de un tratamiento térmico a la harina de avena favorece la capacidad de retención de agua de ésta hasta valores similares a los de la harina de trigo, al igual que ocurre con los valores de los parámetros de viscosidad de la masa. Estos cambios favorecen en gran medida la capacidad fermentativa, llegando a ser superior a la obtenida por una masa hecha solo con harina de trigo, sobre todo cuando el tratamiento térmico se realiza a 100°C, independientemente del nivel de sustitución. Además el tratamiento térmico hace que los valores de pérdidas de peso de los panes durante el horneado disminuyan hasta asemejarse a los obtenidos por los elaborados con harina de trigo 100%.

El tratamiento térmico también favorece el periodo de almacenamiento de los panes dado que las variaciones durante este, en los parámetros de textura y pérdida de peso son incluso menores, para los panes al 10% con harina tratada a 130°C y al 20% tratada a 80°C, que los obtenidos por los panes elaborados solo con harina de trigo.

Estas mejoras generadas por el tratamiento térmico sobre la harina de avena ha ocasionado que se pueda realizar una sustitución de hasta el 20% sin que un panel de consumidores pueda evidenciar diferencias, salvo cuando este nivel de sustitución se realiza con harina tratada a 130°C.

En el caso de la harina de maíz, el tratamiento térmico no genera efecto sobre la capacidad de retención de agua y muy ligero sobre los parámetros de viscosidad, si bien cuando la harina es tratada a 130°C y usada en un nivel de sustitución del 10% su capacidad fermentativa se iguala a la de la harina de trigo. En este sentido, los panes elaborados a este nivel de sustitución con harina a 130°C tienen la misma pérdida de peso que los elaborados con harina de trigo 100%, pérdida que durante el almacenamiento se mantiene semejante a la que se da en los panes elaborados solo con harina de trigo. En cambio, la dureza de estos panes se incrementa durante el envejecimiento, en comparación con los elaborados solo con trigo, no así la gomosidad ni la masticabilidad.

Los cambios generados por el tratamiento térmico a 130°C sobre la harina de maíz hacen que los catadores evalúen los panes elaborados de forma favorable cuando se usa a un nivel de sustitución del 10%, de igual manera que lo hacían para el mismo nivel de sustitución pero empleando harina no tratada. Es por ello que si bien el tratamiento térmico a 130°C favorece en gran medida la capacidad fermentativa de la harina de sorgo, este no se ve justificado dado el resultado final de la cata.

Para la harina de sorgo, el tratamiento térmico produce un gran descenso de la capacidad de retención de agua, alejándose del valor de la harina no tratada y de la de trigo, pero en cambio cuando éste se produce a 130°C, independientemente del grado de sustitución, la capacidad fermentativa se ve muy incrementada alcanzando los valores obtenidos por la harina de trigo. Al mismo tiempo, este tratamiento térmico reduce de forma significativa las pérdidas de peso durante el horneado de los panes llegando a valores similares a la de los panes elaborados solo con harina de trigo.

Desde el punto de vista de la estabilidad al almacenamiento, el tratamiento térmico a 130°C no afecta a los parámetros texturales ni de pérdida de peso cuando la harina se usa en un nivel de sustitución del 10%, en comparación con los panes elaborados solo con harina de trigo. Pero si mejora las características del pan respecto a cuándo no se usa harina tratada dado que los catadores no evidenciaron diferencias en la apreciación global con respecto a los panes tradicionales.

BIBLIOGRAFÍA

AACC, 2000. Approved Methods of American Association of Cereal Chemists. 10th Ed. The Association, St. Paul, MN, USA. Methods 56-11, 76-21.

Cauvain, S.P., Hodge, G., Muir, D.M., Dodds, N.J. 1976. Treatment of grain. U.S., A23B 4/04.

Chesterton, A.K.S., Wilson, D.I., Sadd, P.A., Moggridge, G.D. 2015. A novel laboratory scale method for studying heat treatment of cake flour. *Journal of Food Engineering* (144) 36-44.

Gélinas, P., Mckinnon, C.M., Rodrigue, N., Montpetit, D. 2001. Heating conditions and bread-making potential of substandard flour. *Journal of Food Science* (66) 627-632.

Gilabert, E.J. 2002. Medidas del color. Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

Hanamoto, M., Bean, M. 1979. Process for improving baking properties of unbleached cake flours. US, A21D6/00.

Haynes, L.C., Bettge, A.D., Slade, L. 2009. Soft wheat and flour products methods review: Solvent retention capacity equation correction. AACC International Report (54) 174-175.

Jiranuntakul, W., Puttanlek, Ch., Rungsardthong, V., Pucha-arnon, S. 2011. Microstructural and physicochemical properties of heat-moisture treated waxy and normal starches. *Journal of Food Engineering* (104) 246-258.

Kim, W., Choi, S.G. Kerr, W.L., Johnson, J.W., Gaines, C.S. 2004. Effect of heating temperature on particle size distribution in hard and soft wheat flour. *Journal of Cereal Science* (40) 9-16.

Labanowska, M., Weselucha-Birczyńska, A., Kurdziel, M., Puch, P. 2013. Thermal effects on the structure of cereal starches. EPR and Raman spectroscopy. *Carbohydrate Polymers* (92) 842-848.

Lazaridou, A., Biliaderis, C.G. 2007. Molecular aspects of cereal β -glucan functionality: Physical properties, technological applications and physiological effects. *Journal of Cereal Science* (46) 101-118.

Londono, D.M., Gilissen, Luud J.W.J., Visser, Richard, G.F., Smulders, Marinus, J.M., Hamer, R.J. 2015. Understanding the role of oat β -glucan in oat-based dough systems. *Journal of Cereal Science* (62) 1-7.

López, E.P., Goldner, M.C. 2015. Influence of storage time for the acceptability of bread formulated with lupine protein isolate and added bread gum. *LWT-Food Science and Technology* (64) 1171-1178.

Magee, T.R.A., Neill, G. 2012. Effects of heat treatment on protein denaturation and starch gelatinisation in wheat flour School of Chemistry and Chemical Engineering, Queen's University Belfast, Belfast, UK.

Marston, K., Khouryieh, H., Aramouni, F. 2016. Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *LWT-Food Science and Technology* (65) 637-644.

Nakamura, C., Yoshiki, K., Seguchi, M. 2008. Increased volume of Kasutera cake by dry heating of wheat flour. *Food Science and Technology Research* (14) 431-436.

Neill, G., Al-Muhtaseb, A.H., Magee, T.R.A. 2012. Optimisation of time/temperature treatment, for heat treated soft wheat flour. *Journal of Food Engineering* (113) 422-426.

Pyler, E.J. 1988. *Cake baking technology. Baking science and technology* (979-1027). Kansas City: Sosland Publishing.

Rasper, V.F., DeMan, J.M. 1980. Effect of granule size of substituted starches on the rheological character of composite doughs. *Cereal Chemistry* (57) 331-340.

Russo, J.V., Doe, C.A. 1970. Heat treatment of flour as an alternative to chlorination. *Journal of Food Technology* (5) 363-374.

Serna-Saldívar, S.O. 1996. Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. AGT, Editores. S.A.

Shittu, T.A., Raji, A.O., Sanni, L.O. 2007. Bread from composite cassava-wheat flour: I. Effect of baking time and temperature on some physical properties of bread loaf. *Food Research International* (40) 280-290.

Soleimani Pour-Damanab, A.R., Jafary, A., Rafiee, Sh. 2011. Monitoring the dynamic density of dough during fermentation using digital imaging method. *Journal of Food Engineering* (107) 8-13.

Van Hung, P., Morita, N. 2004. Dough properties and bread quality of flours supplemented with cross-linked cornstarches. *Food Research International* (37) 461-467.

Verdú, S. Vázquez, F. Ivorra, E., Sánchez, A.J., Barat, J.M., Grau, R. 2015. Physicochemical effects of chia (*Salvia hispánica*) seed flour on each wheat bread-making process phase and product storage. *Journal of Cereal Science* (65) 67-73.

Villarino, C.B.J., Jayasena, V. Coorey, R., Chakrabarti-Bell, S., Johnson, S.K. 2015. The effects of Australian sweet lupin (ASL) variety on physical properties of flours and breads. *LWT-Food Science and Technology* (60) 435-443.

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

Con el desarrollo de la tesis doctoral se ha podido abordar el objetivo general que se planteaba inicialmente realizándose un estudio del control y de la mejora de la panificación de masas bajas en harina de trigo. Así se han caracterizados las harinas evidenciándose como de los parámetros evaluados, la mayor carga proteica de la harina de trigo y de avena es el factor más influyente en el comportamiento de estas, si bien en el caso de la harina de avena también lo es su mayor grado lipídico. Para la de maíz lo es su alto contenido en carbohidratos, mientras que para la de sorgo lo es la materia mineral (cenizas) y su mayor tamaño de partícula.

La formulación binaria de harinas, en la que la harina de trigo es sustituida parcialmente por las harinas en estudio, ha mostrado como salvo en el caso del uso de harina de sorgo, se podría realizar una sustitución parcial de la harina de trigo por harina de avena o maíz hasta el 10% sin que un panel de catadores evidencie diferencias en la apreciación global.

Finalmente mediante el estudio del tratamiento térmico de las harinas sustitutorias se ha podido concluir que este es muy interesante cuando la sustitución se realiza con harina de avena dado que se alcanzan rendimientos similares a los obtenidos cuando se usa solo harina de trigo, a un nivel de sustitución del 20%. Para la harina de sorgo también es interesante dado que permite usar niveles de sustitución de hasta el 10%, pero en cambio para la harina de maíz el tratamiento no mejora la apreciación de los panes siendo evaluados favorablemente hasta un 10% independientemente de la aplicación de este.

Futuros estudios pueden ser interesantes en los que se realicen combinaciones de las harinas estudiadas y se testen sobre panes elaborados bajo diferentes parámetros de elaboración.

