

Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el proceso de extrusión de maíz, quinua y avena para la elaboración de harina pregelatinizada

Heber Adalberto Fuentes Oliva

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras
Noviembre, 2016

ZAMORANO
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el proceso de extrusión de maíz, quinua y avena para la elaboración de harina pregelatinizada

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero en Agroindustria Alimentaria en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Heber Adalberto Fuentes Oliva

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2016

Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el proceso de extrusión de maíz, quinua y avena para la elaboración de harina pregelatinizada

Heber Adalberto Fuentes Oliva

Resumen: Existe la necesidad de agregar valor a materias primas como los cereales, para obtener harinas que pueden ayudar en el desarrollo de productos funcionales. El objetivo fue obtener un ingrediente por extrusión termoplástica, a partir de la mezcla de 65% maíz, 20% quinua y 15% avena. Se evaluó la temperatura de procesamiento (100 - 180 °C) y velocidad de rotación del tornillo (120 - 160 rpm). Se estableció un experimento basado en la metodología de superficie de respuesta de tipo central compuesto rotacional de segundo orden. Las unidades experimentales fueron: cuatro puntos factoriales, cuatro puntos axiales y tres repeticiones del punto central. Las variables dependientes fueron: índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA), índice de expansión radial (IER), color, viscosidad, fuerza de quiebra y caracterización visual. Se demostró que a mayor temperatura se obtiene un mayor ISA, alcanzando valores de 2.82%. El IAA aumentó conforme la temperatura incrementó hasta 170 °C y descendió con el aumento de la temperatura (>170 °C), el valor máximo de IAA fue de 5.76 g gel/g materia seca. Se obtiene un mayor IER a menor temperatura, alcanzando valores de 1.94, la velocidad de rotación del tornillo no influyó sobre las variables mencionadas. La harina pregelatinizada ofrece condiciones tecnológicas para su uso en la preparación de galletas. El mejor perfil de procesamiento fue 130.7 °C y 155.8 rpm. Se obtuvieron galletas con la harina procesada en el mejor perfil y se adicionó inulina en la fórmula, por lo tanto es considerado un alimento fuente de fibra.

Palabras clave: Absorción, extrusión termoplástica, harina pregelatinizada.

Abstract: There is a need to add value to raw materials, such as cereals, for flours that can help in the development of functional products. The objective was to obtain an ingredient through thermoplastic extrusion from the mixture of 65% corn, 20% quinoa, and 15% oats. The processing temperature was evaluated (100 - 180 °C) and screw rpm (120 - 160 rpm). An experiment was established based on the surface response methodology central rotational type of second order composite. The experimental units were: four factorial points, four axial points and three replications of the center point. The dependent variables were: WSI, WAI, REI, color, viscosity, force bankruptcy, visual characterization. It was shown that a higher temperature results in increased WSI, reaching values of 2.82%. The WAI showed an increase as the temperature increases to 170 °C and decreased with increasing temperature (>170 °C), the maximum value of IAA was 5.76 g jelly/g dry matter. A higher REI is obtained at a lower temperature, reaching values of 1.94, rpm did not influence the variables mentioned. The pregelatinized flour offers technological conditions for use in the preparation of biscuits. The best processing profile was 130.7 °C and 155.8 rpm. Biscuits were obtained with processed flour in the best profile and inulin was added in the formula, it is considered a food source of fiber.

Key words: Absorption, pregelatinized flour, thermoplastic extrusion.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
4. CONCLUSIONES	32
5. RECOMENDACIONES	33
6. LITERATURA CITADA.....	34
7. ANEXOS	39

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

	Cuadros	Página
1.	Niveles de las variables independientes evaluadas en el estudio	4
2.	Diseño factorial completo del estudio	6
3.	Distribución granulométrica de la mezcla cruda de maíz, quinua y avena	12
4.	Coefficientes de regresión, probabilidades, valores F y R ² para la variable IER en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica	13
5.	Coefficientes de regresión, probabilidades, valores F y R ² para la variable L* en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica.....	15
6.	Coefficientes de regresión, probabilidades, valores F y R ² para la variable a* en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica	17
7.	Coefficientes de regresión, probabilidades, valores F y R ² para la variable b* en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica	19
8.	Corte radial de los extruidos de maíz y de la mezcla de maíz, quinua y avena procesados en diferentes condiciones de temperatura y velocidad de rotación (rpm)	22
9.	Coefficientes de regresión, probabilidades, valores F y R ² para la variable ISA en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica	25
10.	Coefficientes de regresión, probabilidades, valores F y R ² para la variable IAA en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica.....	27
11.	Análisis proximal de la harina extruida (g /100 g de muestra).....	31
	Figuras	Página
1.	Distribución de niveles codificados del experimento.....	5
2.	Flujo de proceso para la obtención de harina mezclada pregelatinizada de maíz, quinua y avena	7
3.	Variaciones en los tonos de color de los parámetros colorimétricos L* a* b* .	8

Figuras	Página
4. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el índice de expansión radial (IER) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica	14
5. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en los valores de luminosidad (L*) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica	16
6. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en las coordenadas de cromaticidad (a*) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica	18
7. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en las coordenadas de cromaticidad (b*) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica.....	20
8. Fuerza de quiebra de los extruidos y galletas de maíz, quinua y avena	21
9. Perfiles viscoamilográficos de harinas mezcladas extruidas de maíz, quinua y avena (A) y de harina de maíz cruda (B).....	24
10. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el índice de solubilidad en agua (ISA) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica	26
11. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el índice de absorción de agua (IAA) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica	28
12. Función de utilidad para la optimización del procesamiento de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica	29
13. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en las características deseables de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica	30

Anexos	Página
1. Resultados de análisis físicos en los tratamientos de la mezcla de maíz, quinua y avena.....	39
2. Formulación de la galleta de maíz, quinua y avena.....	39
3. Configuración de las zonas del tornillo 3:1 de la extrusora Brabender, modelo DSE 20 DN.....	40
4. Extrusora Brabender, modelo DSE 20 DN.....	40
5. Extruidos de maíz, quinua y avena.....	41
6. Matriz de salida circular de 3 mm	41
7. Tubos de centrifuga para hacer análisis de ISA e IAA	42
8. Elaboración de galletas	43
9. IER del extruido de maíz.....	43
10. Fórmula para calcular energía mecánica específica (EME) y regresión lineal .	43

1. INTRODUCCIÓN

Existe la necesidad de agregar valor a materias primas como los cereales, para obtener harinas que puedan ayudar en el desarrollo de productos funcionales, tales como; pre y/o probióticos y formulaciones que puedan ser moldeadas para alimentos de conveniencia, o para propósitos especiales (Vidal 2008).

Se decidió trabajar con una mezcla de maíz, quinua y avena porque estos granos presentan características favorables para la elaboración de harinas; el maíz (*Zea mays*) es un cereal autóctono de Mesoamérica y uno de los cultivos más importantes en el ámbito alimentario e industrial. La producción anual mundial es de 959 millones de toneladas, de las cuales los Estados Unidos es el mayor productor (WCP 2015). La “Yellow Dent” es la variedad que más se ha cultivado para alimentación animal, ingredientes alimentarios y productos industriales. Las partes principales del grano de maíz son el endospermo y el germen, que contiene la mayor parte del almidón y aceite respectivamente. El maíz se procesa principalmente por cuatro métodos; molienda seca, molienda húmeda, procesamiento alcalino, y el proceso de molienda seca para la producción de etanol (Shukla y Cheryan 2000; PMM 2015). La composición nutricional del grano de maíz semiduro comercial es 69.8% carbohidratos, 9.9% proteínas, 5.6% de lípidos y 1.1% de cenizas (Marsaro *et al.* 2005). Por cada 100 g de maíz entero, el contenido de fibra es 7.5 g (WG 2013). Los grits de maíz contienen aproximadamente 2.0% de fibra (Dias 2007).

El segundo ingrediente de la mezcla es la quinua (*Chenopodium quinoa willd*); es un alimento de alto valor nutritivo cuya importancia es cada vez más reconocida en la seguridad alimentaria para las generaciones presentes y futuras (FAO 2015). La producción anual mundial es de aproximadamente 192,507 toneladas (FAOSTAT 2015). La quinua es considerada una semilla (vegetal), pero se consume como un cereal, el grano tiene un elevado contenido proteico, alto contenido de lisina y metionina; no obstante, contiene también hasta un 5% de saponinas, estas son sustancias de sabor amargo que se encuentran en la capa exterior de las semillas. La quinua se utiliza directamente para preparar una bebida fermentada llamada chicha o para hacer sopas. Se puede convertir en harina para bizcochos y tortas, también se utilizan como base para cereales de desayuno. La quinua se ha utilizado en harinas compuestas como sustituto de la harina de trigo o como aditivo de elevado contenido proteínico (FAO 1990; Abugoch 2009). Su composición nutricional es 69% carbohidratos, 16.5% de proteína, 6.5% de grasa (FAO 2013) y 7% de fibra (WG 2013).

El tercer ingrediente es la avena (*Avena sativa*), que es uno de los cereales más consumidos, que por sus especiales cualidades tanto nutritivas como energéticas se convirtió en la base de la alimentación de algunos pueblos y civilizaciones. La producción media anual de avena

es de 25 millones de toneladas (Danty y Ochagavía 2007). Su contenido de proteínas, vitaminas B1, B2 y E, hidratos de carbono y nutrientes es mucho más rico que otros cereales comunes. Cuenta con minerales como; potasio, magnesio, calcio y zinc, oligoelementos, proteínas de alto valor biológico, hierro, fósforo, aminoácidos esenciales como leucina, isoleucina, treonina y metionina. Tiene la función de aumentar el tránsito intestinal debido al contenido de fibras insolubles y solubles que posee (Pérez 2015). Su composición nutricional es 56.61% de almidón, 17.59% de proteína, 4.82% de grasa, 2.01% de fibra cruda y 2.15% de ceniza (Grausgruber *et al.* 2004).

El mecanismo propuesto en este estudio para la producción de harina compuesta por los cereales descritos anteriormente es la extrusión termoplástica. La extrusión termoplástica es un proceso en el cual la presión y el cizallamiento son combinados con el calor para gelatinizar el principal componente de los granos (almidón), ocurriendo una desorganización de la estructura semicristalina original de los gránulos, dando como resultado el denominado almidón termoplástico o almidón plastificado, permitiendo crear nuevas texturas y formas para el producto final (Corradini *et al.* 2007). Además, la extrusión es un proceso muy versátil y con modificaciones mínimas en el equipo básico y en las condiciones de proceso, una gran variedad de productos pueden ser obtenidos. Las harinas y almidones pueden ser destinados para la producción de alimentos extruidos prácticos, como los cereales para el desayuno, snacks, alimentos infantiles y sopas instantáneas. La extrusión también permite la obtención de un efecto nutricional benéfico en el alimento, debido a la mezcla de diferentes materias primas y nutrientes, produciendo una variedad de productos. Además, se puede enriquecer el alimento con vitaminas y minerales, por medio de la suplementación (Carvalho *et al.* 2009).

Con la harina obtenida de la mezcla se elaboró un prototipo de galletas, esto tomando en cuenta la facilidad y rapidez de consumo que presentan. Las personas las pueden comprar en diversos lugares y comerlas donde deseen, combinarlas con otros alimentos y consumir la cantidad que quieran (EUFIC 2016). En la formulación de la galleta se incluyó inulina, que es un carbohidrato de almacenamiento encontrada en varios vegetales, frutas y granos enteros (Cherbut 2002). La mayor parte de la inulina comercializada se sintetiza a partir de la sucrosa. Es compuesta de una molécula de glucosa al final de cada cadena de fructosa. Resiste a la acción de enzimas gástricas, y aumenta la frecuencia de evacuaciones principalmente en individuos constipados (García 2007). Para que un alimento sea considerado fuente o alto en fibra alimentaria debe contener un mínimo de 3 g y 6 g por 100 g de alimento respectivamente (Olagnero *et al.* 2007). Con la adición de inulina en las cantidades adecuadas las galletas fueron consideradas un producto fuente de fibra.

Los objetivos de la investigación fueron los siguientes:

- Obtener un ingrediente por extrusión termoplástica a partir de la mezcla de 65% maíz, 20% quinua y 15% avena.
- Determinar las propiedades físicas, reológicas y microestructurales de los extruidos.
- Determinar el mejor perfil de procesamiento considerando las variables temperatura y velocidad de rotación del tornillo.
- Producir al menos un prototipo de galleta con la harina, la cual cumpla las características deseadas y adicionar una fuente de fibra.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El experimento se realizó en la planta de extrusión y en los laboratorios de análisis fisicoquímicos de Embrapa Agroindústria de Alimentos, ubicada en Avenida de las Américas, Guaratiba, Rio de Janeiro – RJ, Brasil. El Laboratorio de análisis de alimentos Zamorano (LAAZ) se sitúa en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Departamento de Francisco Morazán, 32 km al este de Tegucigalpa, M.D.C, Honduras. Las muestras de maíz, quinua y avena fueron proporcionadas por la Planta Piloto de Cereales y extrusión de Embrapa.

Molienda de materias primas. Los grits de maíz, granos de quinua y harina de avena fueron procesados en el molino de disco de la marca Perten Laboratory Mill 3600 (abertura nivel 2), simulando el tamaño y dimensiones de un grits de maíz. La concentración de la formulación fue 65% de maíz, 20% de quinua y 15% de avena.

Clasificación granulométrica. La distribución del tamaño de partículas es uno de los factores determinantes en la calidad final de los extruidos. Las partículas pequeñas son fundidas más rápidamente y la masa resultante de viscosidad baja, no es transportada apropiadamente. Por el contrario, partículas de mayor tamaño no se funden adecuadamente, provocando retención de flujo, impidiendo el procesamiento (Ascheri *et al.* 2008). Para hacer la clasificación granulométrica se colocaron 100 g de la materia prima cruda en un conjunto de seis tamices y un fondo, luego se agitó por 10 minutos en el RO-TAP RX-29-10 y se pesó la fracción retenida en cada tamiz (Ascheri *et al.* 2008).

Diseño experimental y análisis estadístico. Las variables independientes consideradas fueron: temperatura de procesamiento (100 – 180 °C) en la tercera zona de la extrusora y velocidad de rotación del tornillo (120 - 160 rpm).

Las variables dependientes: índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA), índice de expansión radial (IER), análisis de color, análisis de textura y propiedades de pasta del producto (Viscosidad de pasta).

Paralelamente se fijaron algunas variables: concentraciones de la mezcla, tamaño de partícula (granulometría), humedad de la harina, configuración del tornillo, matriz de salida, taza de alimentación, temperatura en la primera y segunda zona de calentamiento.

Para analizar el efecto combinado de las variables independientes en las características tecnológicas de los extruidos, se estableció un experimento estadístico basado en la metodología de superficie de respuesta de tipo central compuesto rotacional (DCCR) de segundo orden (Box *et al.* 1978). Los parámetros del proceso establecidos como variables independientes fueron estudiados en tres niveles codificados en (-1, 0, +1) calculados de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$x_i = (X_i - Z) / \Delta x_i \quad [1]$$

Donde:

x_i = valor codificado de la variable X_i

X_i = valor real de la variable

Z = valor real de la variable en el punto central

Δx_i = valor del intervalo de variación de x_i

Este diseño también presentó dos niveles de variables axiales, que se codificaron como $-\alpha$ y $+\alpha$. El valor de (α) es la función ($F = 2k$) del número de variables independientes ($k = 2$), se definió conforme a la siguiente ecuación:

$$\alpha = (F)^{1/4} = (2k)^{1/4} = (2^2)^{1/4} = 1.414 \quad [2]$$

El número de unidades experimentales basado en un experimento factorial completo se definió con la siguiente ecuación:

$$n = 2^k + 2k + m \quad [3]$$

Donde:

2^k = número de puntos factoriales

$2k$ = número de puntos axiales (de estrella)

m = número de replicaciones del punto central

Cuadro 1. Niveles de las variables independientes evaluadas en el estudio.

Variables independientes	Niveles				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
X_1 : Temperatura de procesamiento (°C)	100	116	140	164	180
X_2 : Velocidad de tornillo (rpm)	120	126	140	154	160

$\pm \alpha = \pm 1.414$

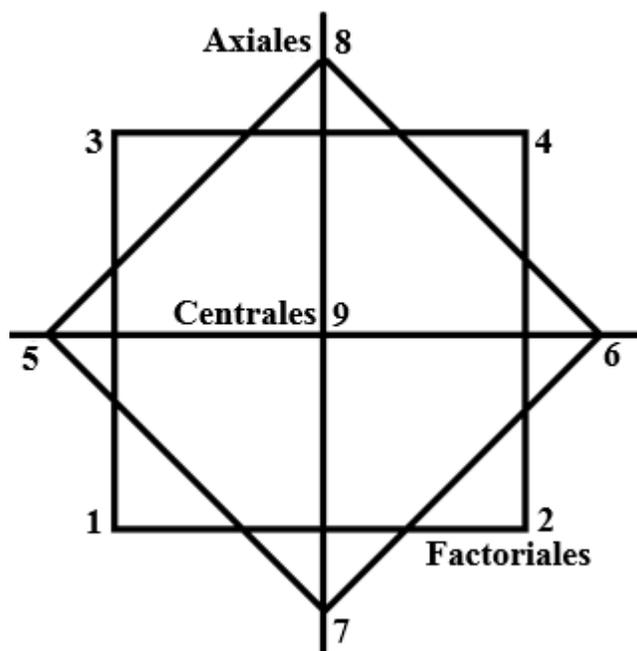


Figura 1. Distribución de niveles codificados del experimento.

Los valores máximos y mínimos de cada variable independiente fueron establecidos de acuerdo a literatura consultada, y recomendaciones técnicas a partir de pruebas preliminares hechas en Embrapa. El análisis de las variables independientes sobre el proceso se hizo en el software STATISTICA 7.0[®] y la validación del modelo se realizó mediante el análisis de varianza (ANDEVA) con el uso de la prueba de distribución F a una $P < 0.10$. Para las regresiones se utilizaron los valores codificados. El modelo es clasificado como significativo y predictivo cuando el F calculado es mayor al F tabular (Teba 2014). Para evaluar la adecuación del modelo se usó el coeficiente de determinación (R^2). Si el coeficiente de determinación está por encima de 0.60 el modelo es clasificado como predictivo, y si está por debajo es clasificado como tendencioso (Rocha 2009). Otro parámetro para ser considerado predictivo es la falta de ajuste, ésta debe ser no significativa (Thompson 1982). Se utilizó SAS[®] 9.4 para comparación de medias a través de la prueba Tukey, de los datos de análisis físicos con una significancia de 95%.

Cuadro 2. Diseño factorial completo del estudio.

Ensayo	X ₁	X ₂
1	-1 (112)	-1 (126)
2	-1 (112)	1 (154)
3	1 (168)	-1 (126)
4	1 (168)	1 (154)
5	- α (100)	0 (140)
6	α (180)	0 (140)
7	0 (140)	- α (120)
8	0 (140)	α (160)
9 (C)	0 (140)	0 (140)
10 (C)	0 (140)	0 (140)
11 (C)	0 (140)	0 (140)

X₁= Temperatura de la tercera zona de la extrusora (°C)

X₂= Velocidad de rotación del tornillo (rpm)

$\pm \alpha = \pm 1.414$

Acondicionamiento de la materia prima. Se acondicionó toda la materia prima, conforme a la humedad fija establecida que fue de 20%. La cantidad de agua potable a ser adicionada se calculó con la siguiente fórmula (Ascheri *et al.* 2006):

$$Y = (U_f - U_i) \times Pa / 100 - U_f \quad [4]$$

Donde:

Y= Cantidad de agua a ser adicionada (g)

U_f= humedad final de la muestra (%)

U_i= humedad inicial de la muestra (%)

Pa= peso de la muestra (g)

Para determinar la humedad inicial se utilizó la balanza de determinación de humedad rápida por infrarrojo de la marca Shimadzu modelo Moisture Balance MOC-120-H y el peso para la muestra en triplicado fue de 2 g.

La muestra total después de acondicionada fue homogeneizada, luego colocada en un saco plástico y almacenada bajo refrigeración durante 24 horas para obtener una distribución y absorción uniforme del agua. Después de este tiempo la harina quedó lista para el proceso de extrusión.

Condiciones de procesamiento. Para la elaboración de los extruidos se utilizó una extrusora mono tornillo, marca Brabender, modelo DSE 20 DN, (Duisburg, Alemania), con sistema de extrusión a través de fricción mecánica y energía térmica, tasa de compresión del tornillo 3:1, tasa de alimentación 25 rpm, humedad fija 20%, la temperatura en la zona de alimentación fue de 50 °C, en la zona de amasado fue 90 °C y en la tercera zona fue (100 - 180 °C), sistema de refrigeración neumático, para control de temperatura en la camisa de extrusión, velocidad de rotación del tornillo de 120 a 160 rpm, capacidad de producción aproximada de 8.5 Kg.h⁻¹ y matriz de salida circular de 3 mm de espesor. La energía mecánica específica (EME) calculada para los puntos centrales fue de 181.8 Wh/kg.

Extrusión. La extrusión se inició después de mantener los parámetros bajo control; las tres zonas de calentamiento con sus respectivas temperaturas, velocidad de rotación del tornillo correcta y la presión estable. Se comenzó el proceso con la alimentación del material (previamente acondicionado) a velocidad controlada.

Los extruidos fueron colectados en bandejas, sometidos a secado y empacados en bolsas debidamente nombradas para posteriores análisis.

El proceso de secado se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Silva (2007) en el horno con circulación de aire (Fabbe modelo 170) a 60 °C/4 horas.

Las muestras de los once tratamientos fueron colocadas en bolsas plásticas y luego guardadas a temperatura ambiente. Después los extruidos fueron molidos en el Laboratory Mill 3600 de disco (apertura número 2), y posteriormente en el molino de martillo de la marca Perten Laboratory Mill 3100, obteniendo de esta manera las harinas.

Se colocaron las muestras en bolsas y se guardaron en el refrigerador a 4°C. De cada tratamiento se dejaron 50 g de extruidos para calcular el IER y para posteriores análisis. Todos los procesos descritos anteriormente se resumen en la figura 2.

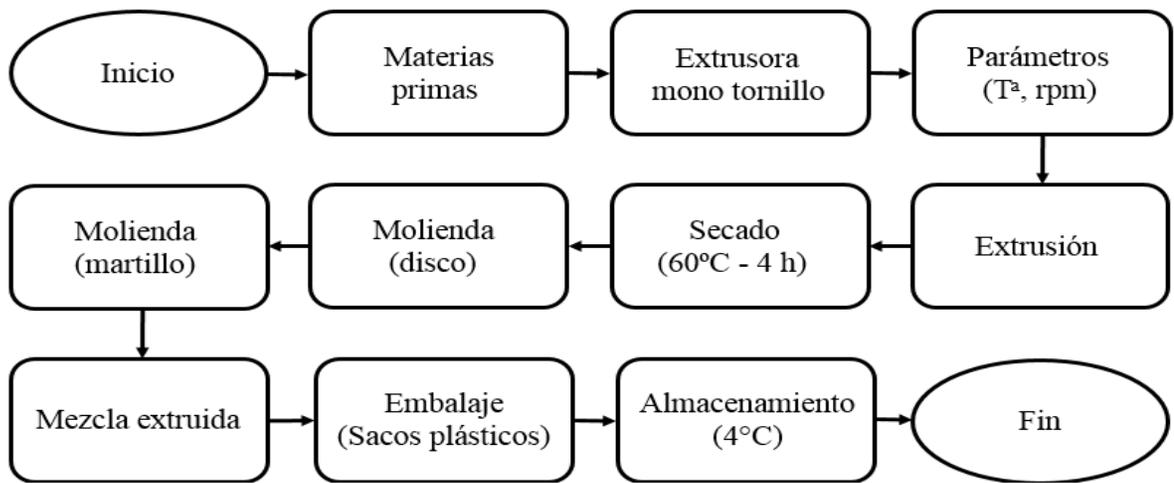


Figura 2. Flujo de proceso para la obtención de harina mezclada pregelatinizada de maíz, quinua y avena.

Análisis físicos de los extruidos de maíz, quinua y avena

Índice de expansión radial (IER). El índice de expansión radial se determinó por la metodología propuesta por (Alvarez *et al.* 1988) y siguió la ecuación descrita a continuación:

$$IER = [D / D_0]^2 \quad [5]$$

Donde:

D = diámetro del producto extruido

D₀ = diámetro de la matriz

El diámetro se midió 30 minutos después de que el producto se retiró del horno con circulación de aire. Para la determinación de esta medida se utilizó un pie de rey metálico de la marca Vonder (150 mm - 6"). Se realizaron un total de 15 repeticiones por tratamiento y después se calculó la media.

Análisis de Color. Los análisis de color fueron realizados en un Colorímetro (Hunter L* a* b*, modelo 45/0). La determinación fue basada en el sistema CIEL*a*b*, donde L* indica luminosidad, que varía de cero (negro) a 100 (blanco), mientras que, a* y b* representan las coordenadas de cromaticidad, en donde +a* indica tendencia a rojo, -a* tendencia a verde, +b* indica tendencia a amarillo y -b* tendencia a azul (Eyidemir y Hayta 2009).

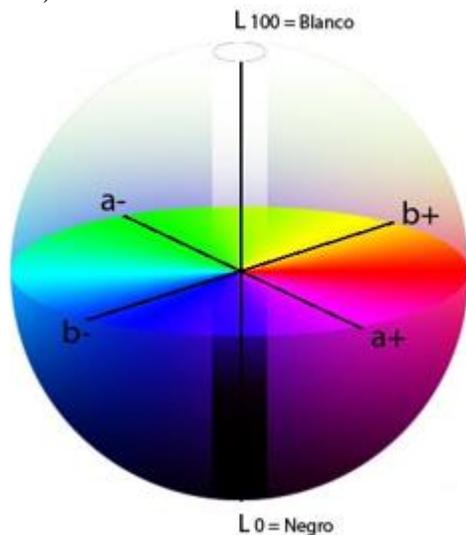


Figura 3. Variaciones en los tonos de color de los parámetros colorimétricos L* a* b*.
Fuente: (Santos 2013).

Análisis de textura. La textura de los extruidos fue determinada a través de las medidas de dureza (Bouvier *et al.* 1997) por medio del equipo Texture Analyser TA TX2 (Stable Micro System, UK).

Las muestras fueron perforadas por una sonda cilindro de 2 mm a una profundidad determinada que correspondía a aproximadamente un 40-60% del diámetro de los productos extruidos. Las galletas fueron perforadas totalmente por una sonda tipo guillotina. Las características evaluadas fueron relacionadas con la fuerza de quiebra, que representó la resistencia del material extruido y las galletas a su penetración inicial (Anton y Luciano 2007).

Caracterización visual de los extruidos. Se evaluó la estructura macroscópica de los extruidos. Las muestras se cortaron radialmente en duplicado. Cada muestra fue visualizada a través de un scanner de la marca Epson Perfection 1240U (Tan *et al.* 1994).

Determinación de humedad. La humedad de las harinas en el horno se determinó de acuerdo con la metodología de la AACCC (44-15A). Se colocaron 22 pesa filtros en el horno con circulación de aire (Fabbe modelo 170) a 105 °C por una hora y media para estandarizarlos y así evitar cualquier humedad. Después se enfriaron en un desecador por 40 minutos.

Se tararon los pesafiltros y se pesó 2 g de cada tratamiento en la balanza analítica en duplicado, anotando ambos valores. Después se colocaron en el horno con circulación de aire (Fabbe modelo 170) a 105 °C por 16 horas, se dejó enfriar y se pesó nuevamente. El cálculo de la humedad se realizó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = [(m_o - m) \times 100 / m_o] \quad [6]$$

Donde:

m_o = masa inicial de la muestra

m = masa final de la muestra

Tamizado. Se utilizaron tamices de 0.106 mm y 0.212 mm, la muestra se colocó en el tamiz de 0.212 mm, después los tamices fueron agitados en el RO-TAP RX-29-10 por 10 minutos para cada tratamiento (Haver y Boecker 2010). Luego se guardaron separadamente las tres fracciones de harina obtenidas en bolsas plásticas para los análisis de viscosidad, índice de solubilidad en agua e índice de absorción en agua.

Propiedades tecnológicas

Propiedades viscoamilográficas. La viscosidad de pasta de las muestras fue determinada con el uso del analizador rápido de viscosidad (Rapid Visco Analyser – RVA) serie 4, de la marca Newport Scientific con incorporación del software Thermocline for Windows. Los análisis se realizaron en duplicado para cada tratamiento (Vargas 2013).

Para la realización de este análisis fue utilizada la fracción de la harina retenida entre los tamices de 0.106 y 0.212 mm; diferencias en el tamaño de partícula entre las muestras puede ocasionar mala interpretación de los resultados obtenidos (Becker *et al.* 2001).

Para el análisis de RVA fueron utilizados 3 g de harina extruida con humedad corregida para 14% en base húmeda, y enseguida se adicionó agua destilada hasta la obtención del peso final de 28 g conforme a la metodología descrita por (Ascheri *et al.* 2006). El perfil de análisis utilizado fue “extrusión 1”, que presenta como características el mantenimiento inicial del sistema a 25 °C durante 2 minutos. El calentamiento ocurre en seguida y a los 7 minutos la temperatura máxima es alcanzada (95 °C) donde permanece por 3 minutos. Poco después, es iniciado el enfriamiento hasta una temperatura de 25 °C, totalizando 20 minutos de análisis.

La interpretación de los amilogramas se basó en los siguientes parámetros:

Viscosidad inicial o viscosidad a frío (VInicial). Es el valor de la viscosidad en cP (Centipoise), en la temperatura de 25 °C, en el inicio del ciclo de calentamiento.

Viscosidad máxima (VMáxima). Es el valor de la viscosidad en el punto máximo de la curva, a 95 °C, obtenido durante el ciclo de calentamiento, expresado en cP.

Viscosidad final en el ciclo de enfriamiento (VFinal). Es el valor de la viscosidad en cP, al final del análisis (a 25 °C).

Tendencia a retrogradación (TR) o Setback. Es la diferencia entre la viscosidad final y el valor de la viscosidad más baja durante se mantenga a 95 °C.

Quiebra de la viscosidad (QV) o Breakdown. Es la diferencia entre la viscosidad máxima y mínima durante se mantenga a 95 °C.

Índice de Solubilidad en Agua/Índice de Absorción de Agua. La determinación de IAA e ISA se realizó de acuerdo a la metodología descrita por (Anderson *et al.* 1969) modificada. Este análisis demuestra el índice de solubilidad y de absorción de agua en el material extruido dependiendo del tratamiento térmico al cual fue sometido.

Aproximadamente 1 g de cada tratamiento (en cuadruplicado y en base húmeda) fueron pesados en tubos de centrífuga previamente tarados en la balanza analítica de la marca BEL Engineering. Después se adicionó 5 ml de agua destilada, se agitó por 20 segundos en el

agitador de tubos de ensayo tipo Vortex y luego se adicionaron los 5 ml restantes totalizando 10 ml.

Después de la adición de agua destilada se dejaron los tubos reposando por 30 minutos. Posteriormente fueron colocados en la centrífuga (Hermle modelo Z383) por 15 minutos bajo rotación de 9000 rpm (adaptado).

Al salir de la centrífuga, el sobrenadante de los tubos se colocó en pesa filtros previamente tarados, que posteriormente se secaron en el horno con circulación de aire (Fabbe modelo 170) a 105 °C/4 horas y luego pesados en la balanza analítica. Se encontró el porcentaje de residuo que se solubilizó en agua destilada adicionada al inicio del análisis, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{ISA} = [\text{Peso del residuo de evaporación (g)} / \text{Peso de muestra (g)}] \times 100 \quad [7]$$

Los tubos retirados de la centrífuga (sin el sobrenadante) fueron pesados y se encontró el índice de absorción de la harina, de acuerdo con la ecuación descrita abajo:

$$\text{IAA} = [\text{Peso del residuo de centrifugación (g)} / \text{Peso de muestra (g)}] = \text{g gel/g de materia seca} \quad [8]$$

Análisis proximal. Éste análisis se hizo en una muestra de harina pregelatinizada por extrusión. Para la selección de la muestra se utilizó una mezcla de las tres fracciones de tamaño de partícula y se tomó una pequeña cantidad de cada uno de los 11 tratamientos hasta llegar a una cantidad de 100 g de muestra. Se determinó el contenido de carbohidratos según la Resolución – RDC n. ° 360 de 23 de diciembre de 2003, proteína con el método Kjeldahl, POP FQ 012, rev. 3. F = 6.25, grasa y humedad mediante el método Am 5-04, AOCS – American Oil Chemists’ Society 2009, fibra con el método enzimático-gravimétrico POP FQ 015, rev.3, y cenizas usando gravimetría, incineración a 550 °C. POP FQ 011, rev. 3.

Elaboración del prototipo galleta. Se usó una formulación adaptada proporcionada por la panadería de la planta piloto de cereales y extrusión. Se mezclaron primero todos los ingredientes secos incluyendo la inulina y luego los líquidos; después se hizo un amasado hasta lograr una mezcla homogénea. La masa se colocó en moldes pequeños de forma rectangular, posteriormente se colocaron las galletas en bandejas que fueron puestas en el horno a 160 °C por 15 minutos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación granulométrica. Es importante conocer la granulometría de la materia prima, para saber de esta manera la homogeneidad del material a procesar. En el cuadro 3 se detalla la distribución granulométrica de la mezcla donde se observa que el 90% del material tenía un tamaño de partícula mayor a 500 μm .

Cuadro 3. Distribución granulométrica de la mezcla cruda de maíz, quinua y avena.

Abertura (μm)	Retención (%)
1180	28.36
850	14.59
710	20.43
500	26.96
425	5.17
300	1.95
Fondo	2.08

Índice de Expansión Radial (IER). El IER aumentó a medida que el tratamiento térmico disminuyó, sin embargo la velocidad de rotación (rpm) no tuvo efecto (figura 4).

La variable lineal de temperatura fue significativa a una $P < 0.10$ como se muestra (cuadro 4), demostrando un efecto de aumento del índice de expansión radial (IER) en base al descenso de la temperatura de procesamiento en la tercera zona de la extrusora. La variable velocidad de rotación (rpm) no tuvo ninguna influencia sobre el IER con una $P > 0.10$. La interacción entre ambas variables fue significativa a una $P < 0.10$. Esto ocurre cuando el efecto de una variable independiente cambia dependiendo del nivel de una segunda variable independiente (León y Montero 2000). El coeficiente de determinación (R^2) está por debajo de 0.60 demostrando que un 57% de los datos se ajustaron al modelo y el 43% no fueron explicados mediante el análisis. La falta de ajuste fue significativa a un $P < 0.10$ y el F calculado fue mayor al F tabular, por lo tanto, el modelo presentó un comportamiento tendenciosos.

Cuadro 4. Coeficientes de regresión, probabilidades, valores F y R² para la variable IER en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica.

Factor	Coefficiente de regresión	P
Intercepto	1.53E+00	7.63E-04*
X ₁	-2.02E-01	1.61E-02*
X ₁ ²	-6.70E-03	8.48E-01
X ₂	5.25E-02	1.80E-01
X ₂ ²	4.64E-02	2.71E-01
X ₁ X ₂	-2.21E-01	2.63E-02*
Falta de Ajuste		3.86E-02*
R ²		0.57
F calculado>F tabular		19.5>3.453

X₁: Temperatura (°C), X₂: Velocidad de rotación (rpm), *: Significativo para una P<0.10.

La siguiente ecuación matemática representa el índice de expansión radial (IER) basado en los resultados significativos del cuadro 4.

$$\text{IER} = 1.53 - 0.20 X_1 - 0.22 X_1 X_2 \quad [9]$$

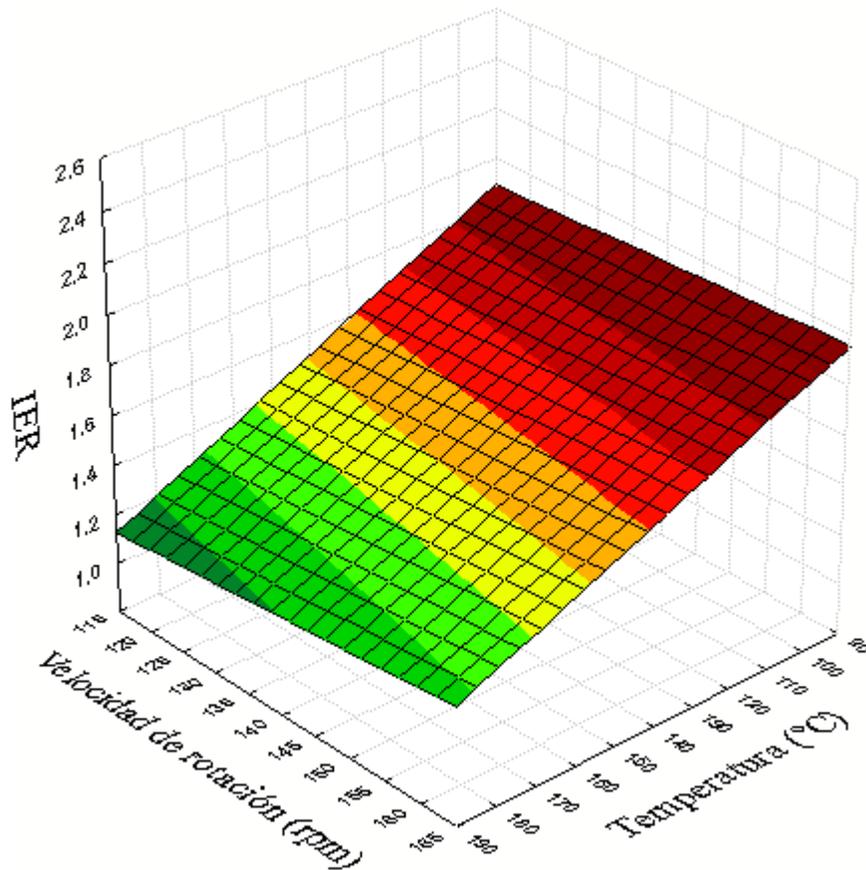


Figura 4. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el índice de expansión radial (IER) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica.

El gráfico de superficie de respuesta de la Figura 4 para IER se realizó utilizando la ecuación 9. Este demuestra que a menor temperatura de procesamiento se obtiene un mayor IER, alcanzando valores de 1.14 a 1.94 bajo las condiciones establecidas de temperatura. En arroz, frijol, y maíz Moura (2012) reportó valores de 1.85 y 4.12 a 193 y 126 °C, respectivamente, él observó que a medida que se aumenta la temperatura del proceso la expansión del producto disminuye. El IER está relacionado con la capacidad de la estructura del material fundido de mantener la integridad de sus células al salir de la matriz de la extrusora ya que a elevadas temperaturas ocurre una gran reducción de la viscosidad de los productos amiláceos por la desintegración del almidón, provocando la pérdida de vapor de agua retenido en la estructura ocasionando el colapso de las células de aire y disminuyendo el IER (Moura 2012). La presencia de fibras y proteína en la mezcla de materias primas forma productos con menor índice de expansión por la interacción de estos componentes y el almidón, además, la fibra puede romper las paredes celulares, evitando la formación de burbujas de aire en su máximo potencial (Anton *et al.* 2008). Era de esperar que los extruidos de esta mezcla resultaran en bajos índices de expansión radial debido al contenido de proteína y fibra que aporta la quinua y la avena. La velocidad de rotación del tornillo no influyó en los resultados de índice de expansión, esto puede ser atribuido al limitado rango de velocidad de rotación estudiado en este trabajo (120 - 160 rpm), lo cual, aumenta el

tiempo de retención del material en el cañón y provoca un mayor grado de cocimiento y la consecuente disminución de IER. En un estudio con arroz, frijol y maíz se verificó que los mayores índices de expansión radial son encontrados a valores por encima de 160 rpm del tornillo (menor tiempo de retención en el cañón) (Moura 2012). Este análisis demuestra la expansión radial de los extruidos dependiendo del tratamiento térmico y velocidad de rotación del tornillo al cual fueron sometidos en el proceso de extrusión. El IER es una importante característica de productos extruidos que posibilita la evaluación inmediata de la severidad de procesamiento y permite verificar si las materias primas y las mezclas realizadas generan productos adecuados en relación a textura (Teba 2014).

Luminosidad (L*). Los valores de luminosidad aumentaron con el incremento de la temperatura y con el descenso de la velocidad de rotación (rpm) (figura 5).

La variable lineal y cuadrática de temperatura fue significativa a una $P < 0.10$ (cuadro 5), demostrando un efecto de aumento en los valores de luminosidad (L*) en base al incremento de la temperatura de procesamiento en la tercera zona de la extrusora. La variable lineal velocidad de rotación (rpm) fue significativa con una $P < 0.10$, demostrando un efecto de aumento en los valores de luminosidad en base al descenso de la velocidad de rotación (rpm). No se presentó interacción entre ambas variables. El coeficiente de determinación (R^2) demuestra que un 88% de los datos se ajustaron al modelo y el 12% no fueron explicados mediante el análisis. La falta de ajuste no fue significativa y el F calculado fue mayor al F tabular, por lo tanto, el modelo presentó un comportamiento predictivo.

Cuadro 5. Coeficientes de regresión, probabilidades, valores F y R^2 para la variable L* en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica.

Factor	Coefficiente de regresión	P
Intercepto	5.03E+01	2.52E-04*
X ₁	4.62E+00	1.10E-02*
X ₁ ²	-2.07E+00	7.06E-02*
X ₂	-1.78E+00	6.80E-02*
X ₂ ²	-1.96E-01	7.68E-01
X ₁ X ₂	-1.19E+00	2.28E-01
Falta de Ajuste		1.83E-01
R ²		0.88
F calculado > F tabular		13.8 > 3.07

X₁: Temperatura (°C), X₂: Velocidad de rotación (rpm), *: Significativo para una $P < 0.10$.

La siguiente ecuación matemática representa la luminosidad (L*) basado en los resultados significativos del cuadro 5.

$$\text{Luminosidad} = 50.28 + 4.61 X_1 - 2.07 X_1^2 - 1.78 X_2 \quad [10]$$

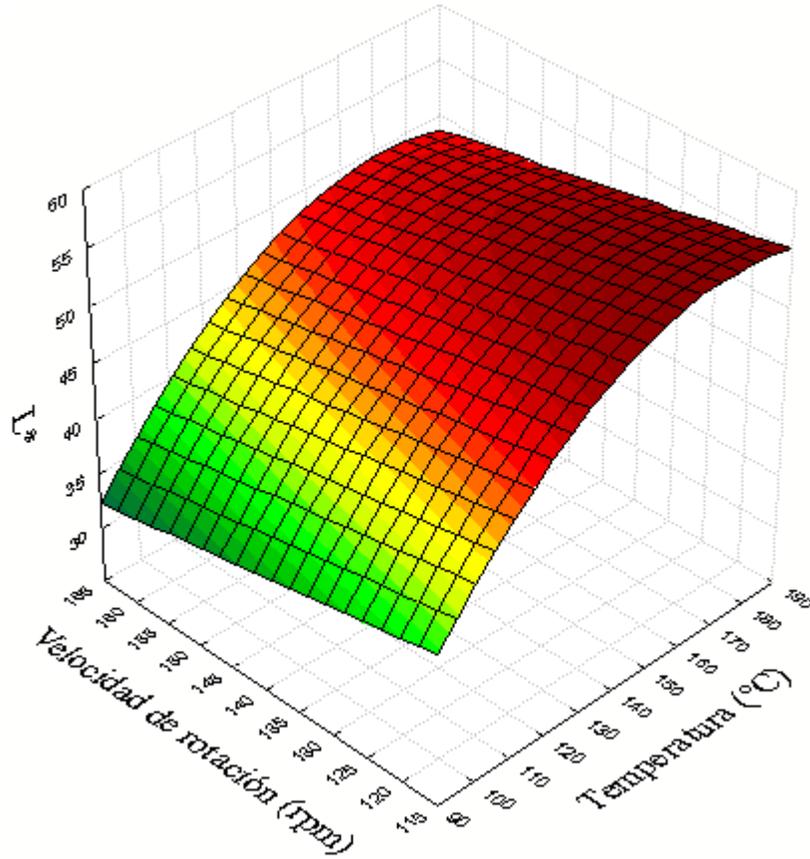


Figura 5. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en los valores de luminosidad (L^*) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica.

El gráfico de superficie de respuesta de la Figura 5 para L^* se realizó basado en la ecuación 10. Éste demuestra un aumento de la luminosidad basado en el incremento de la temperatura de procesamiento y la disminución de la velocidad de rotación (rpm), alcanzando valores de 32.4 a 55 bajo las condiciones establecidas. Teba (2014) afirma que los valores más elevados de luminosidad fueron obtenidos en los ensayos con temperatura media a alta, reportando valores de 87.36 y 86.91 a temperatura de 160 y 140 °C respectivamente. Las condiciones de procesamiento utilizadas en la extrusión favorecen la reacción entre azúcares reductores y aminoácidos, resultando en la formación de compuestos coloridos. Si el oscurecimiento es muy intenso, colores y sabores indeseables pueden aparecer. Los cambios de color durante la extrusión puede ser un indicador para evaluar la severidad o intensidad del proceso en relación a los cambios químicos y nutricionales (Nascimento 2010). La velocidad de rotación del tornillo aumenta el grado de cocimiento de los productos (Ascheri 2014); por lo tanto, se observó que a menor velocidad de rotación (rpm) los productos son más claros (valores de 40 a 55) debido al menor grado de cocimiento por causa de la baja rotación del tornillo.

Este aumento en claridad de los extruidos de maíz, quinua y avena también puede ser atribuido a la homogeneidad provocada por el proceso de extrusión. Este análisis demuestra

la claridad del color, donde el valor 0 indica un color negro y el valor 100 un color blanco (Eyidimir y Hayta 2009) dependiendo del tratamiento térmico y velocidad de rotación del tornillo al cual fue sometido el material extruido.

Cromaticidad (a*). Ninguna de las variables estudiadas presentó significancia ($P > 0.10$) (cuadro 6), no obstante, se muestra interacción entre ambas. El coeficiente de determinación (R^2) demuestra que un 76% de los datos se ajustaron al modelo y el 24% no fueron explicados mediante el análisis. La falta de ajuste no fue significativa y el F calculado fue mayor al F tabular, por consiguiente, el modelo presentó un comportamiento predictivo.

Cuadro 6. Coeficientes de regresión, probabilidades, valores F y R^2 para la variable a* en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica.

Factor	Coefficiente de regresión	P
Intercepto	1.09E+01	6.65E-04*
X ₁	-1.56E-01	4.59E-01
X ₁ ²	5.88E-01	1.03E-01
X ₂	1.44E-01	4.89E-01
X ₂ ²	1.55E-01	5.27E-01
X ₁ X ₂	9.80E-01	5.63E-02*
Falta de Ajuste		3.40E-01
R ²		0.76
F calculado > F tabular		8.10 > 3.36

X₁: Temperatura (°C), X₂: Velocidad de rotación (rpm), *: Significativo para una $P < 0.10$.

La siguiente ecuación matemática representa la Cromaticidad (a*) basado en los resultados significativos del cuadro 6.

$$\text{Cromaticidad (a*)} = 10.87 + 0.98 X_1 X_2 \quad [11]$$

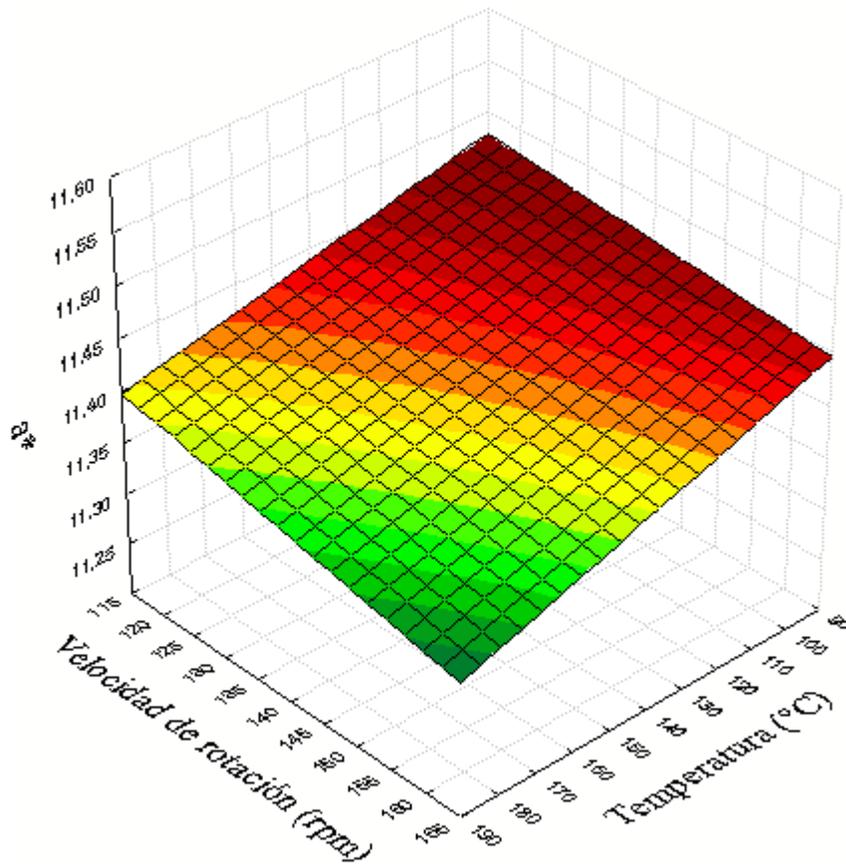


Figura 6. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en las coordenadas de cromaticidad (a^*) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica.

El gráfico de superficie de respuesta de la Figura 6 para cromaticidad (a^*) se realizó usando la ecuación 11. Éste demuestra un leve aumento de la cromaticidad (a^*) basado en la disminución de la temperatura de procesamiento y la velocidad de rotación (rpm), alcanzando valores de 11.33 a 11.47 bajo las condiciones establecidas. A medida que aumenta la temperatura y la velocidad de rotación (rpm), se obtienen cromaticidades (a^*) más bajas con valores de 11.33. Estos valores son positivos, por lo tanto, se determinó que todos los productos extruidos estuvieron en la clasificación de color rojo, algunos con mayor intensidad que otros. Se mostró interacción entre la temperatura y la velocidad de rotación (rpm); esto significa que el efecto de una variable cambió dependiendo del nivel de la segunda (León y Montero 2000). Este análisis representa las coordenadas de cromaticidad, en donde $+a^*$ indica tendencia a rojo y $-a^*$ tendencia a verde (Eyidemiir y Hayta 2009), dependiendo del tratamiento térmico y velocidad de rotación del tornillo al cual fue sometido el material extruido.

Cromaticidad (b*). La variable lineal de temperatura fue significativa a una $P < 0.10$ (cuadro 7), demostrando un efecto de aumento en los valores de cromaticidad (b*) en base al incremento de la temperatura de procesamiento en la tercera zona de la extrusora. La variable velocidad de rotación (rpm) no tuvo ninguna influencia sobre la cromaticidad (b*) con una $P > 0.10$. No se presentó interacción entre ambas variables. El coeficiente de determinación (R^2) demuestra que un 76% de los datos se ajustaron al modelo y el 24% no fueron explicados mediante el análisis. La falta de ajuste no fue significativa y el F calculado fue mayor al F tabular, de tal forma que el modelo presentó un comportamiento predictivo.

Cuadro 7. Coeficientes de regresión, probabilidades, valores F y R^2 para la variable Cromaticidad (b*) en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica.

Factor	Coefficiente de regresión	P
Intercepto	2.79E+01	2.57E-04*
X ₁	2.19E+00	1.53E-02*
X ₁ ²	5.09E-01	2.59E-01
X ₂	-1.57E-01	6.24E-01
X ₂ ²	3.14E-01	4.37E-01
X ₁ X ₂	9.97E-01	1.23E-01
Falta de Ajuste		1.24E-01
R ²		0.76
F calculado > F tabular		17.28 > 3.36

X₁: Temperatura (°C), X₂: Velocidad de rotación (rpm), *: Significativo para una $P < 0.10$.

La siguiente ecuación matemática representa la Cromaticidad (b*) basado en los resultados significativos del cuadro 7.

$$\text{Cromaticidad (b*)} = 27.88 + 2.18 X_1 \quad [12]$$

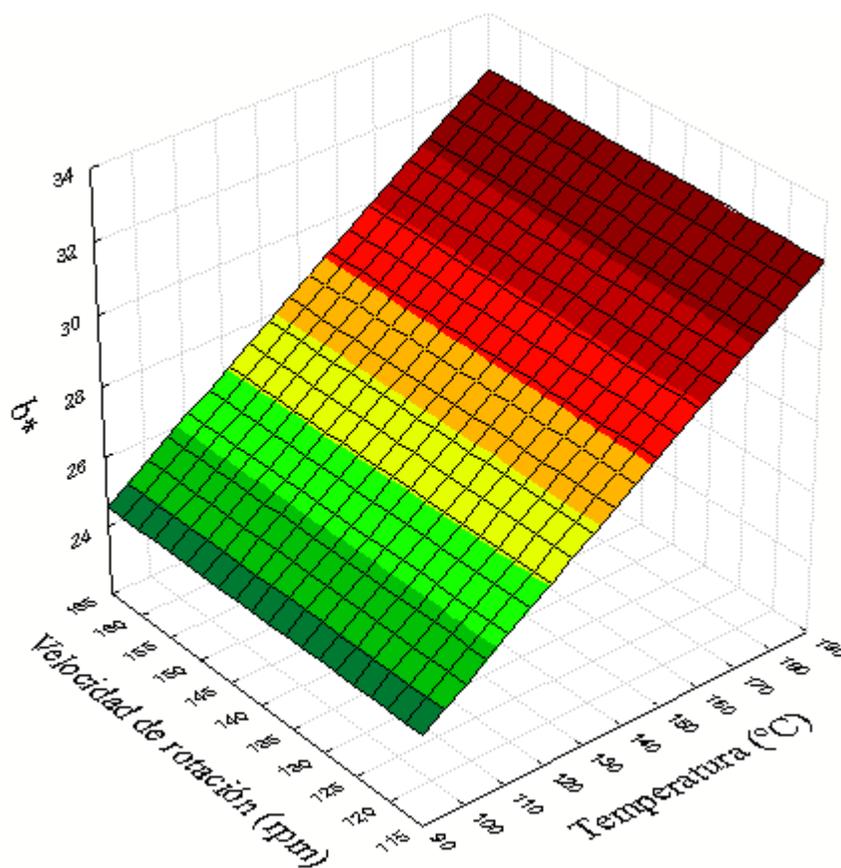


Figura 7. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en las coordenadas de cromaticidad (b^*) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica.

El gráfico de superficie de respuesta de la Figura 7 para cromaticidad (b^*) se realizó utilizando la ecuación 12. Este demuestra un aumento de la cromaticidad (b^*) basado en el incremento de la temperatura de procesamiento variando de 24.5 a 32.5 bajo las condiciones establecidas. Los valores más elevados para cromaticidad fueron encontrados en el tratamiento 6 (180 °C, 140 rpm) y en el tratamiento 4 (168 °C, 154 rpm), mientras tanto los valores menores se observaron en el tratamiento 2 (112 °C, 154 rpm) y en el tratamiento 1 (112 °C, 126 rpm). Estos resultados destacan la fuerte influencia de la temperatura en la tercera zona de la extrusora, ya que temperaturas más altas tienden a elevar la cromaticidad (b^*), contrario a los resultados obtenidos por Teba (2014) en un estudio con extrusión de una mezcla de arroz y concentrado proteico de suero de leche, el cual, demuestra un efecto negativo del aumento de la temperatura sobre la cromaticidad (b^*). La diferencia de resultados puede ser por las matrices de materias primas usadas y por la interacción entre las variables independientes encontradas en ese estudio. Los resultados muestran valores positivos, indicando que todos los tratamientos presentaron tendencia a color amarillo. Cuanto mayor sea el valor de cromaticidad (b^*), la tonalidad amarilla será más intensa (Teba 2014). El rango de velocidad de rotación del tornillo estudiado (120 - 160 rpm) no tuvo influencia sobre esta variable.

Este análisis representa las coordenadas de cromaticidad, en donde +b* indica tendencia a amarillo y -b* tendencia a azul (Eyidemiir y Hayta 2009) dependiendo del tratamiento térmico y velocidad de rotación del tornillo al cual fue sometido el material extruido.

Fuerza de quiebra. El éxito de un producto alimenticio está directamente relacionado a la textura (Anton y Luciano 2007).

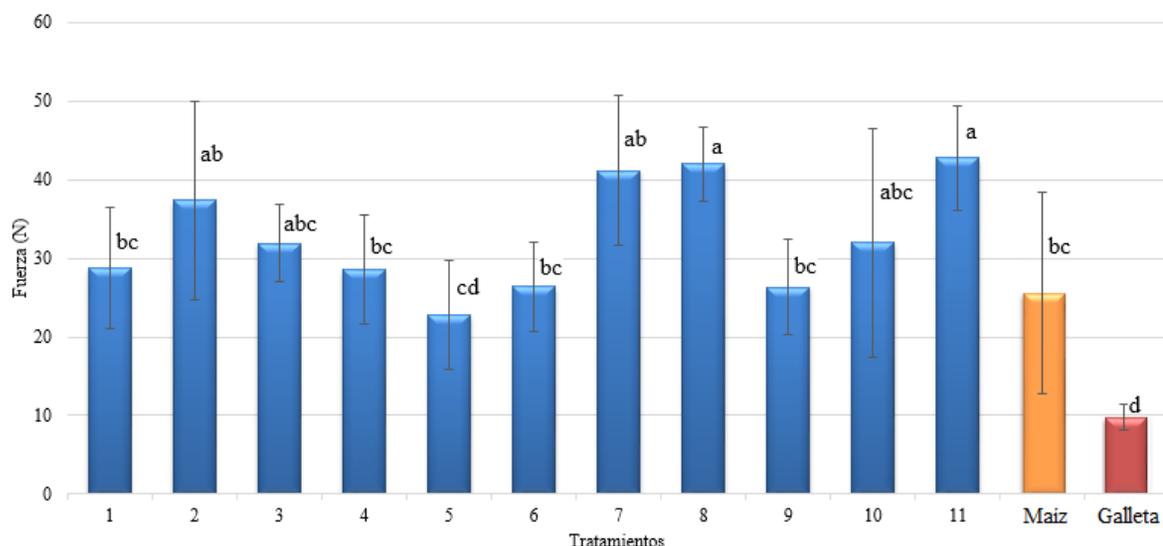


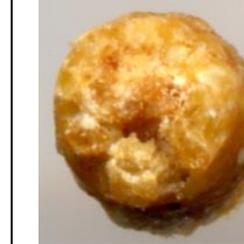
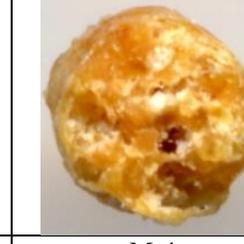
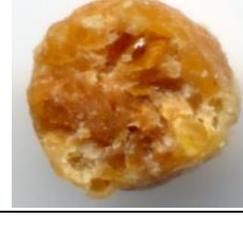
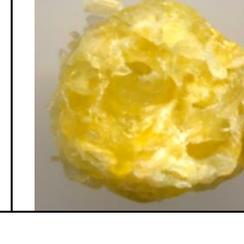
Figura 8. Fuerza de quiebra de los extruidos y galletas de maíz, quinua y avena.

La Figura 8 muestra que al aplicar fuerza sobre los extruidos y galletas a través de la sonda circular de 2 mm y la guillotina, respectivamente, se rompe la estructura celular, lo que genera un sonido característico que contribuye a la sensación de crujiente. Existe una relación inversa entre fuerza de quiebra y expansión de los productos (Anton y Luciano 2007). Debido a los bajos índices de expansión que se obtuvieron, esta relación de fuerza de quiebra y expansión no fue tan marcada. Se puede observar que los bajos valores de diámetro del material extruido ocasionaron dificultad al momento del descenso y penetración de la sonda, provocando una desviación estándar grande entre las repeticiones de cada tratamiento. Los tratamientos que presentaron la mayor fuerza de quiebra fueron el 2, 3, 7, 8, 10 y 11, con valores de 32 a 42.7 N. El tratamiento 5 presentó el menor valor de fuerza de quiebra (22.7 N). El extruido que fue producido únicamente con maíz presentó menor fuerza de quiebra que la mayoría de los extruidos de la mezcla, con un valor de 25.6 N, esto se debe a su alto índice de expansión (3.2), lo cual disminuye la fuerza de quiebra aplicada, por la porosidad del material. Vargas (2013) reportó valores de 0.57 N de fuerza de quiebra para extruidos de sorgo; estos valores difieren de los extruidos de maíz, quinua y avena porque están correlacionados con el alto índice de expansión radial (7.89). La fuerza de quiebra de la galleta elaborada con el mejor tratamiento fue de 9.76 N, Vargas (2013) para las galletas de sorgo reportó valores de 14.83 N, la diferencia con el valor encontrado en la galleta de maíz quinua y avena se puede atribuir a las diferentes matrices utilizadas,

además en la formulación de las galletas de maíz, quinua y avena se utilizó un 60% de harina de trigo, lo que podría disminuir la fuerza de quiebra.

Caracterización visual de los extruidos de maíz, quinua y avena. Los tratamientos fueron evaluados por medio de imágenes obtenidas por scanner para verificar las diferencias provocadas por las condiciones de procesamiento en la estructura interna de los extruidos.

Cuadro 8. Corte radial de los extruidos de maíz y de la mezcla de maíz, quinua y avena procesados en diferentes condiciones de temperatura y velocidad de rotación (rpm).

1 (112 °C, 126 rpm)	2 (112 °C, 154 rpm)	3 (168 °C, 126 rpm)	4 (168 °C, 154 rpm)
			
5 (100 °C, 140 rpm)	6 (180 °C, 140 rpm)	7 (140 °C, 120 rpm)	8 (140 °C, 160 rpm)
			
9 (140 °C, 140 rpm)	10 (140 °C, 140 rpm)	11 (140 °C, 140 rpm)	Maíz (140 °C, 140 rpm)
			

En las imágenes del cuadro 8 se puede observar la similitud entre las estructuras internas de los extruidos producidos con la mezcla de maíz, quinua y avena. En general, los tratamientos presentaron tamaño pequeño de poros, sin embargo, algunos tratamientos presentaron poros grandes. El extruido producido únicamente con maíz presentó una mejor distribución y mayor tamaño de poros, esto puede ser atribuido a su mayor índice de expansión (3.29). El alto índice de expansión puede ser por el bajo contenido de proteína y fibra en los grits de maíz, lo cual favorece el aumento de la expansión de maíz. El color difiere entre tratamientos. Al analizar las imágenes se observa que las muestras con menor temperatura de procesamiento (100 y 112 °C) presentaron un color más oscuro y mayor

heterogeneidad de tamaño y distribución de poros, esto se atribuye a la alta densidad de células.

Perfil de viscosidad de pasta de harinas mezcladas extruidas de maíz, quinua y avena.

En la figura 9 se muestran los perfiles viscoamilográficos de las harinas mezcladas extruidas y de una harina de maíz cruda.

Viscosidad inicial o viscosidad a frío (VInicial). Se puede observar que la viscosidad inicial de las muestras a 25°C (viscosidad a frío) es menor a 50 cP para todos los tratamientos, similar a los resultados de la harina de maíz cruda. Esto demuestra una modificación parcial del almidón, contrario a los resultados obtenidos por Teba (2014) donde el material extruido presenta una mayor viscosidad inicial a 25 °C por la modificación del almidón en comparación con una muestra cruda.

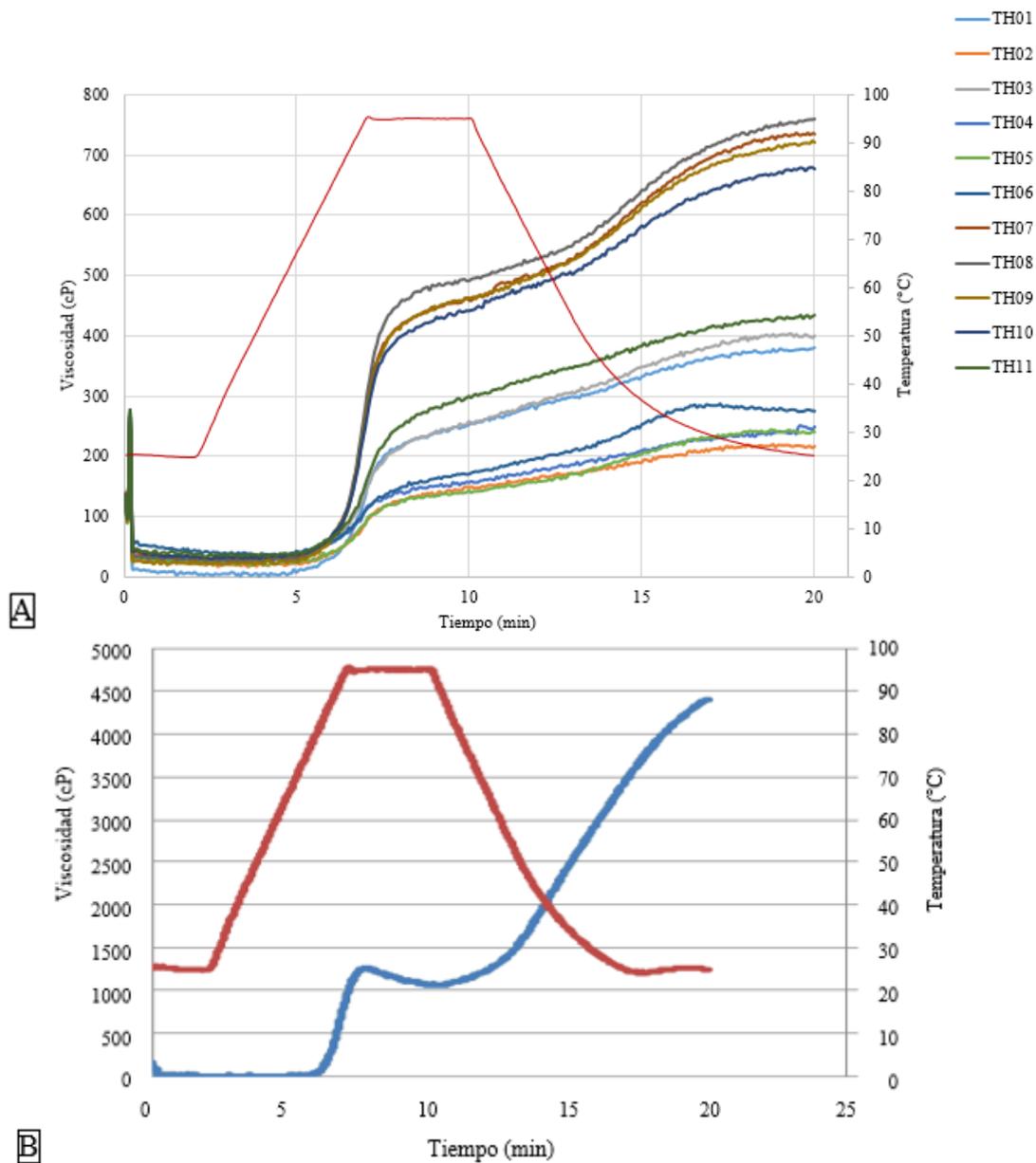
Viscosidad máxima (VMáxima). La viscosidad máxima a 95 °C es un parámetro que mide la resistencia de los gránulos de almidón y su colapso resultante de la acción de la temperatura y el cizallamiento (Ruano 2013). De acuerdo a los resultados obtenidos, los tratamientos 7, 8, 9 y 10 demostraron una mayor capacidad de absorción de agua a 95 °C (443 a 495 cP), lo cual, es deseable para la harina destinada a elaboración de galletas. Al compararlo con la muestra de maíz crudo se observa una variación mayor a 750 cP; esta diferencia era de esperarse debido a la presencia de almidón pre gelatinizado en las harinas extruidas.

Viscosidad final en el ciclo de enfriamiento (VFinal). Los mayores valores de viscosidad final a 25 °C fueron presentados por los tratamientos 7, 8, 9 y 10 (678 a 759 cP). Los valores elevados de viscosidad final para los tratamientos anteriormente mencionados fueron atribuidos a la proporción de gránulos de almidón intacto en la harina como lo observado por Ruano (2013). La muestra de maíz cruda presentó un valor de 4,400 cP, debido a que el almidón no fue modificado.

Tendencia a retrogradación (TR) o Setback. Es la diferencia entre la viscosidad final y el valor de la viscosidad más baja durante se mantenga a 95 °C; lo cual, permite evaluar el comportamiento del almidón en la etapa de enfriamiento. Se puede observar que los tratamientos 2, 4 y 5 presentan los menores valores de tendencia a retrogradación (84, 103 y 111 cP respectivamente), siendo una característica importante en la harina para evitar dureza en el producto final. Los almidones extruidos tienden a retrogradar y acercar moléculas de amilosa y amilopectina aumentando la viscosidad de pasta (Teba 2014). La harina de maíz cruda presentó un valor de tendencia a retrogradación de 3,300 cP.

Se puede observar que las características de viscosidad de pasta mostraron susceptibilidad a los parámetros de procesamiento establecidos, lo cual resultó en tres grupos de viscosidad

máxima (Figura 9 “A”). El primer grupo de 400 a 500 cP, el segundo de 200 a 300 cP y el tercero de 100 a 150 cP. Estas diferentes condiciones implican en posibilidades de uso de alternativas, tomando en cuenta características deseables en un producto alimenticio.



Fuente: (Nascimento 2010).

Figura 9. Perfiles viscoamilográficos de harinas mezcladas extruidas de maíz, quinua y avena (A) y de harina de maíz cruda (B).

Análisis de Índice de Solubilidad en Agua (ISA). El ISA aumentó a medida que el tratamiento térmico incrementó, no obstante, la velocidad de rotación del tornillo (rpm) no tuvo efecto (figura 10).

La variable cuadrática de temperatura fue significativa a una $P < 0.10$ (cuadro 9), demostrando un efecto de aumento en el índice de solubilidad en agua (ISA) en base al incremento de la temperatura de procesamiento en la tercera zona de la extrusora. La variable velocidad de rotación (rpm) no tuvo ninguna influencia sobre el ISA con una $P > 0.10$, no se presentó interacción entre ambas variables. El coeficiente de determinación (R^2) demuestra que un 83% de los datos se ajustaron al modelo y el 17% no fueron explicados mediante el análisis. La falta de ajuste no fue significativa y el F calculado fue mayor al F tabular, por consiguiente, el modelo presentó un comportamiento predictivo.

Cuadro 9. Coeficientes de regresión, probabilidades, valores F y R^2 para la variable ISA en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica.

Factor	Coefficiente de regresión	P
Intercepto	2.40E+00	1.20E-03*
X ₁	3.25E-03	9.55E-01
X ₁ ²	4.02E-01	2.20E-02*
X ₂	7.06E-02	3.00E-01
X ₂ ²	8.39E-02	3.01E-01
X ₁ X ₂	-7.04E-02	4.32E-01
Falta de Ajuste		2.96E-01
R^2		0.83
F calculado > F tabular		30.8 > 3.36

X₁: Temperatura (°C), X₂: Velocidad de rotación (rpm), *: Significativo para una $P < 0.10$.

La siguiente ecuación matemática representa el índice de solubilidad en agua (ISA) basado en los resultados significativos del cuadro 9.

$$ISA = 2.39 + 0.40 X_1^2 \quad [13]$$

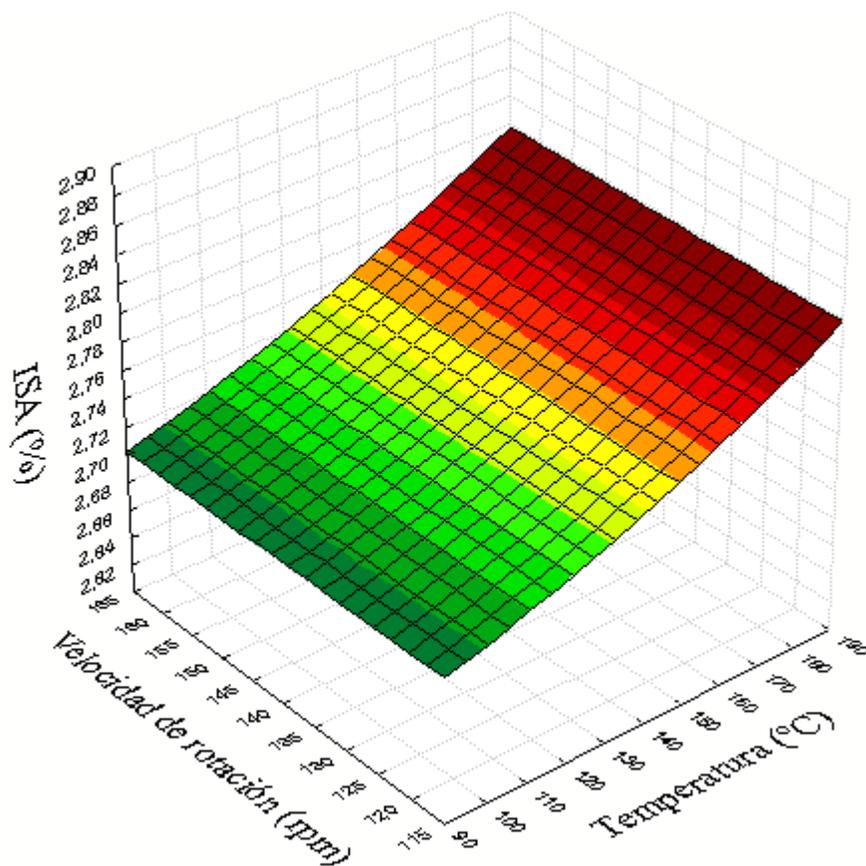


Figura 10. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el índice de solubilidad en agua (ISA) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica.

El gráfico de superficie de respuesta de la Figura 10 para ISA se realizó usando la ecuación 13. Este demuestra que a mayor temperatura de procesamiento se obtiene un mayor ISA alcanzando valores de 2.82% bajo las condiciones establecidas de temperatura. El ISA se relaciona con la cantidad de sólidos solubles en una muestra seca, verificando el grado de severidad del tratamiento en función de la degradación, gelatinización, dextrinización y consecuente solubilización del almidón (Carvalho *et al.* 2002). Según Moura (2012) el índice de solubilidad en agua aumenta con la severidad del tratamiento térmico. Onwulata *et al.* (2010), reportó que con una temperatura de 60 °C en la última zona de la extrusora los índices de solubilidad en agua fueron de 6 y 5% para quinua y maíz respectivamente y en un rango de temperatura de 77 a 162 °C, la harina de avena extruida presentaba valores de 5.45 a 8.95% (Gutkoski y El-Dash 1999). Es probable que estos valores sean diferentes por la mezcla de maíz, quinua y avena resultando en un alto contenido proteico, lipídico y de fibra, influenciando el grado de cocimiento del almidón (Gutkoski y El-Dash 1997). Las interacciones moleculares entre el almidón degradado, componentes proteicos, lipídicos y fibra pueden aumentar el peso molecular provocando la disminución de la solubilidad (Dogan y Karwe 2003). El rango de velocidad de rotación del tornillo estudiado (120 - 160 rpm) no tuvo influencia sobre el Índice de Solubilidad en Agua. En un estudio realizado en maíz y ajonjolí se encontró que la velocidad de rotación del tornillo (324 a 387 rpm) no

tuvo influencia sobre el ISA (Nascimento 2010). Este análisis demuestra la solubilidad de la harina en agua, dependiendo del tratamiento térmico y velocidad de rotación del tornillo al cual fue sometido el material extruido.

Índice de Absorción de Agua (IAA). El IAA es indicativo de la cantidad de agua absorbida por los gránulos de almidón (Carvalho *et al.* 2002). El IAA aumentó a medida que el tratamiento térmico incrementó, no obstante, la velocidad de rotación (rpm) no tuvo efecto (figura 11).

La variable lineal y cuadrática de temperatura fue significativa a una $P < 0.10$ (cuadro 10), demostrando un efecto de aumento hasta determinado punto del índice de absorción de agua (IAA) en base al incremento de la temperatura de la tercera zona de la extrusora. La variable velocidad de rotación (rpm) no tuvo ninguna influencia sobre el IAA con una $P > 0.10$; no se presentó interacción entre ambas variables. El coeficiente de determinación (R^2) demuestra que un 87% de los datos se ajustaron al modelo y el 13% no fueron explicados mediante el análisis. La falta de ajuste no fue significativa y el F calculado fue mayor al F tabular, por consiguiente, el modelo presentó un comportamiento predictivo.

Cuadro 10. Coeficientes de regresión, probabilidades, valores F y R^2 para la variable IAA en función de la temperatura y velocidad de rotación (rpm) en el proceso de extrusión termoplástica.

Factor	Coefficiente de regresión	P
Intercepto	5.68E+00	4.52E-04*
X ₁	3.62E-01	3.93E-02*
X ₁ ²	-3.21E-01	6.78E-02*
X ₂	1.17E-03	9.89E-01
X ₂ ²	-2.08E-03	9.83E-01
X ₁ X ₂	1.71E-02	8.85E-01
Falta de Ajuste		4.95E-01
R ²		0.87
F calculado > F tabular		22.25 > 3.1131

X₁: Temperatura (°C), X₂: Velocidad de rotación (rpm), *: Significativo para una $P < 0.10$.

La siguiente ecuación matemática representa el índice de absorción de agua (IAA) basado en los resultados significativos del cuadro 10.

$$IAA = 5.68 + 0.36 X_1 - 0.32 X_1^2 \quad [14]$$

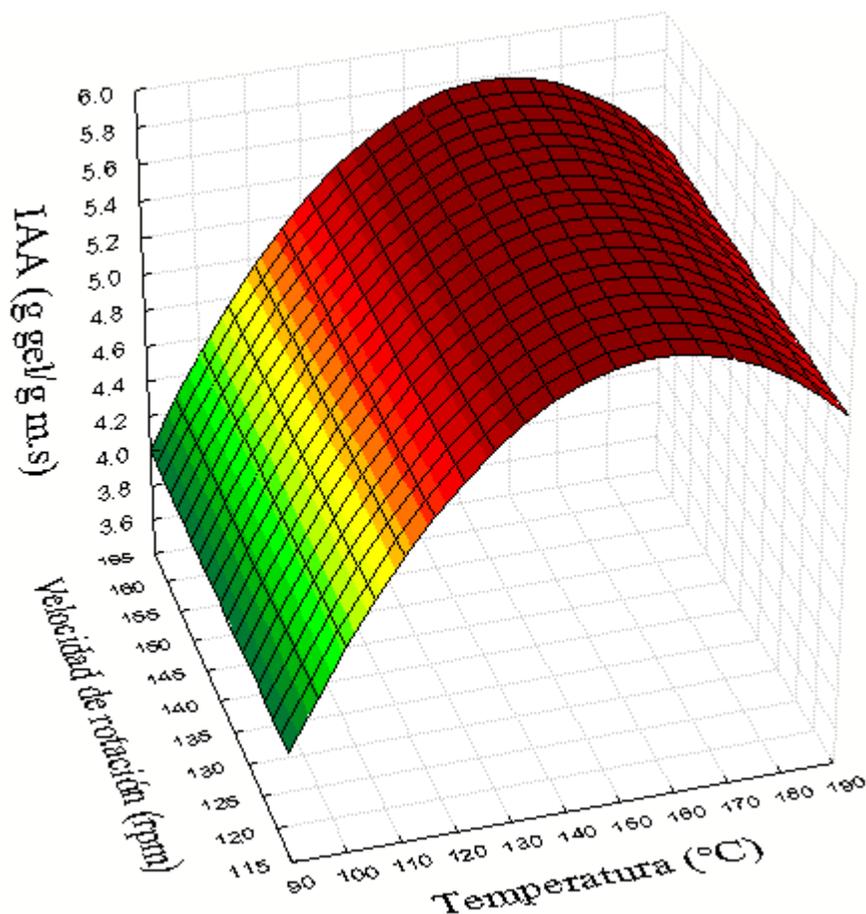


Figura 11. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el índice de absorción de agua (IAA) de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica.

El gráfico de superficie de respuesta de la Figura 11 para IAA se elaboró basado en la ecuación 14. Este demuestra un aumento del IAA conforme la temperatura de procesamiento incrementa hasta 170 °C, después se observa un descenso en el índice de absorción de agua a medida que se aumenta la temperatura (>170 °C), demostrando un comportamiento lineal y cuadrático, esto puede ser atribuido a que el índice de absorción de agua desempeña un papel importante en la evaluación de la severidad de las condiciones de extrusión termoplástica, y altas temperaturas pueden provocar el rompimiento de la estructura del gránulo de almidón reduciendo la capacidad de absorber agua (Teba 2014). Según Mercier y Feillet (1975) el índice de absorción de agua en extrusión de maíz, trigo y arroz aumentó conforme al incremento de temperatura hasta alcanzar 180 °C, y después disminuyó. Es posible que este comportamiento de disminución del IAA sea porque la matriz está constituida mayormente por maíz (65%). El valor máximo de IAA alcanzado fue de 5.76 g gel/g de materia seca bajo las condiciones establecidas de temperatura. Onwulata *et al.* (2010) obtuvo resultados similares, con una temperatura de 60 °C en la última zona de la extrusora reportó índices de 5.4 y 4.6 g gel/g de materia seca para quinua y maíz respectivamente. En un estudio realizado en extrusión de trigo, arroz y plátano se

reportaron valores de 6.5 y 5.5 g gel/g de materia seca a temperaturas de 80 y 87 °C respectivamente (Carvalho *et al.* 2002). En un rango de temperatura de 77 a 162 °C los extruidos de avena presentaron valores de IAA de 4.16 a 6.35 g gel/g de materia seca (Gutkoski y El-Dash 1999). Este análisis demuestra la absorción de agua de la harina dependiendo del tratamiento térmico y velocidad de rotación del tornillo al cual fue sometido el material extruido.

Función de utilidad. Cuando se tiene más de una variable dependiente, generalmente el interés es encontrar los valores operacionales óptimos de las variables independientes que cumplan simultáneamente todos los requisitos necesarios de las variables dependientes. Se debe encontrar una serie de condiciones operacionales que optimice todas las respuestas, o que las mantenga en rangos deseables (Calado y Montgomery 2003).

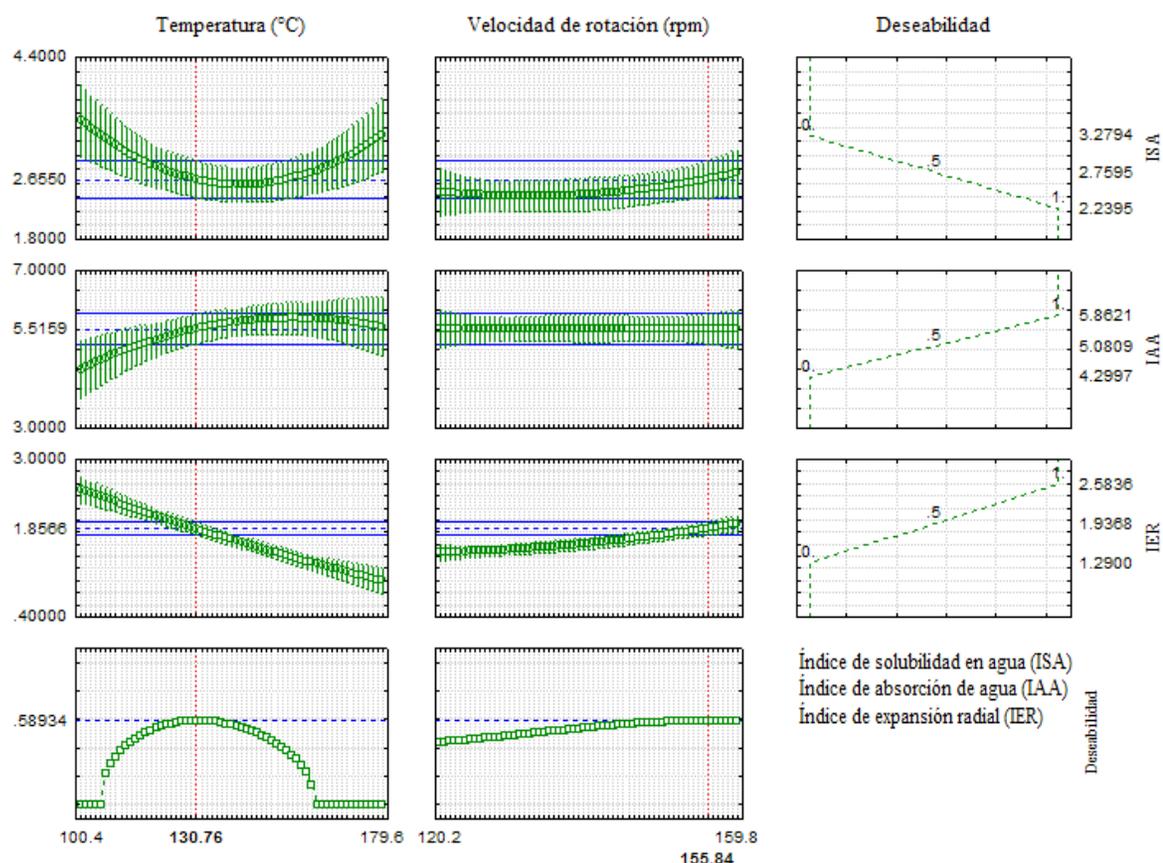


Figura 12. Función de utilidad para la optimización del procesamiento de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica.

Se utilizó un procedimiento de optimización con restricción. Si la respuesta era la deseada, se le asignaba un valor de 1, y si la respuesta no era óptima se asignaba un valor de 0. De este modo la función de utilidad seleccionó las variables independientes para maximizar la deseabilidad global (figura 12).

Para la función de utilidad fueron consideradas las variables dependientes: ISA, IAA e IER, debido a que estas son las variables de mayor importancia en las características deseadas de las harinas destinadas para la elaboración de las galletas. La variable Setback no fue considerada porque en los resultados de ANDEVA no presentó significancia ($P > 0.10$). Para ISA se buscaron los valores menores y para IAA e IER los valores mayores.

Se determinó que los mejores parámetros de procesamiento en el rango estudiado fueron $130.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 155.8 para temperatura y velocidad de rotación (rpm) respectivamente (ambos valores son señalados por la línea vertical roja en la figura 12). Con esos parámetros de procesamiento se permite cumplir la deseabilidad para ISA, IAA e IER requeridas en la harina.

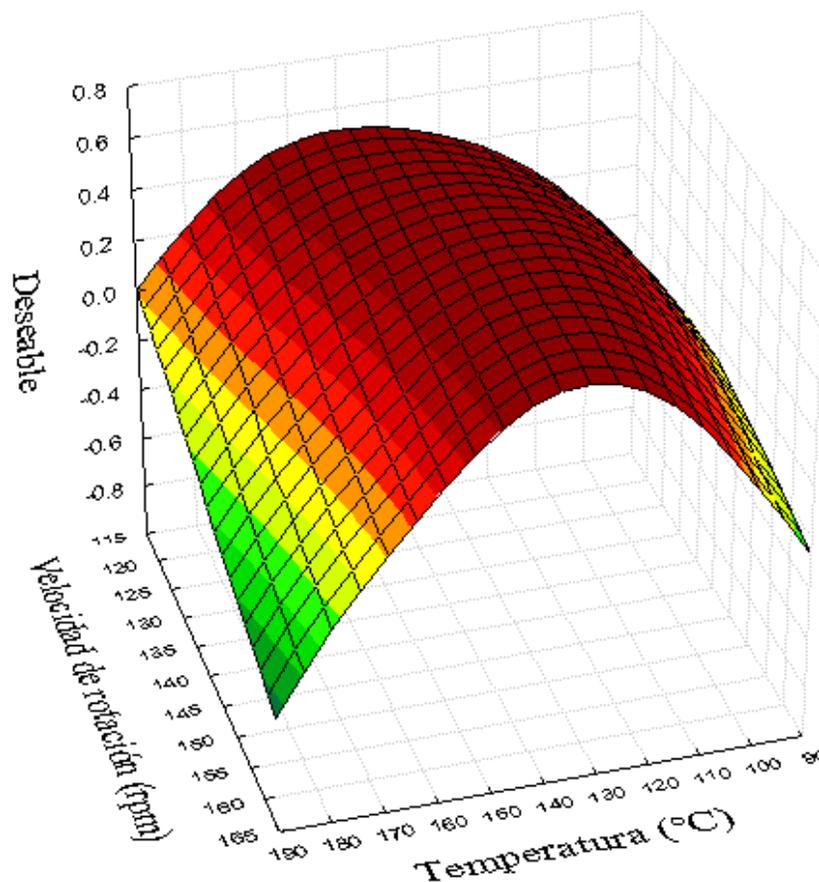


Figura 13. Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en las características deseables de la mezcla de harina pregelatinizada de maíz, quinua y avena por extrusión termoplástica.

En la Figura 13 se observa la optimización de las variables independientes en el rango propuesto; temperatura ($100 - 180\text{ }^{\circ}\text{C}$) y velocidad de rotación del tornillo ($120 - 160$ rpm).

Cuadro 11. Análisis proximal de la harina extruida (g /100 g de muestra).

Harina Cenizas	Carbohidrato	Proteína	Grasa	Fibra	Humedad	
Maíz, quinua y avena	79.71	10.31	ND	3.52	5.37	1.09

ND: cantidad abajo del límite mínimo de detección del método.

Se puede enfatizar en el elevado contenido de proteína y fibra con valores de 10.31 y 3.52 g/100 g de muestra. El contenido de grasa no fue determinado, porque se encontraba abajo del límite mínimo de detección (0.3 g/100 g de muestra), por lo tanto la harina es baja en grasa, lo cual es deseable en alimentos (Cuadro 11).

4. CONCLUSIONES

- Es posible elaborar una harina pregelatinizada con la mezcla de 65% maíz, 20% quinua y 15% avena, utilizando una extrusora termoplástica mono tornillo.
- Mayores temperaturas incrementaron el ISA. El IAA aumentó conforme la temperatura incrementó hasta 170 °C y disminuyó con el aumento de la temperatura (>170 °C). Se obtuvo un mayor IER a menor temperatura. La variación de la velocidad de rotación del tornillo no tuvo efecto significativo en los índices ISA e IAA.
- La luminosidad presentó un aumento basado en el incremento de la temperatura de procesamiento y la disminución de la velocidad de rotación (rpm). La cromaticidad (a*) aumentó levemente basado en la disminución de la temperatura de procesamiento y la velocidad de rotación (rpm). La cromaticidad (b*) presentó aumento basado en el incremento de la temperatura de procesamiento.
- Las características de viscosidad de pasta mostraron susceptibilidad a los parámetros establecidos, resultando en tres grupos de viscosidad máxima.
- Para obtener harina con bajos valores de ISA (2.24) y altos valores de IAA (5.86) e IER (2.58), el mejor perfil de procesamiento es 130.7 °C y 155.8 rpm.
- Se obtuvo un prototipo de galletas con la harina procesada a 130.7 °C y 155.8 rpm. Se adicionó 4.6% de inulina en la fórmula, por lo que es considerado un alimento fuente de fibra.

5. RECOMENDACIONES

- Dislocar los valores de temperatura y velocidad de rotación del tornillo (rpm) para determinar los parámetros óptimos en el procesamiento de harina destinada a la elaboración de galletas.
- Evaluar otras variables independientes como humedad, concentración de materias primas, tamaño de partícula y configuración del tornillo.
- Evaluar sensorialmente la aceptabilidad de la galleta.
- Inocular y cuantificar microorganismos probióticos en la formulación de las galletas.
- Analizar la harina extruida a través de microscopía electrónica de barrido y perfil de aminoácidos.

6. LITERATURA CITADA

AACC International. Cross Referencing AACC International Methods Old numbers, new numbers (en línea). Consultado el 24 de febrero de 2016. Disponible en <http://methods.aaccnet.org/methodnumbering.aspx>

Abugoch LE. 2009. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, Chemistry, Nutritional, and Functional Properties. *Advances in Food and Nutrition Research* 58: 1-31.

Alvarez L, Koundury KP, Harper JM. 1988. A general model for expansion of extruded products. *Journal of Food Science* 53 (2): 609-615.

Anderson RA, Conway HF, Pfeifer VF, Griffin Junior L. 1969. Gelatinization of Corn Grits by Roll and Extrusion Cooking. *Cereal Science Today* 14 (1): 4-11.

Anton AA, Fulcher RG, Arntfield SD. 2008. Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *Food Chemistry* 113: 989-996.

Anton AA, Luciano FB. 2007. Instrumental texture evaluation of extruded snack foods: a review. *Ciencia y tecnología Alimentaria* 5 (4): 245-251.

Ascheri DP, Ascheri JL, Carvalho CW. 2006. Caracterização da farinha de bagaço de jaboticaba e propriedades funcionais dos extrusados. *Ciência Tecnologia. Alimentos, Campinas* 26 (4).

Ascheri JL, Carvalho CW. 2008. Processo de extrusão de alimentos: aspectos tecnológicos para o desenvolvimento e produção de alimentos para consumo humano. Embrapa Agroindustria de Alimentos. 82 p.

Ascheri JL, Carvalho CW. 2014. Processo de Extrusão de Alimentos: Aspectos tecnológicos para o desenvolvimento e produção de alimentos para consumo humano e animal. Embrapa Agroindustria de Alimentos. 115 p.

Becker A, Hill SE, Mitchell JR. 2001. Milling a further parameter affecting the rapid visco analyzer (rva) profile. *Cereal Chemistry* 78: 199-172.

Bouvier JM, Bonneville R, Goullieux A. 1997. Instrumental methods for the measurement of extrudate crispness. *Agro-Food Industry Hi-Technology*: 16-19.

Box GE, Hunter WG, Hunter JS. 1978. Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building. John Wiley & Sons. New York.

Calado V, Montgomery D. 2003. Planejamento de Experimentos usando o Statistica. Livia Krykhtine. Rio de Janeiro-Brasil. E-papers Serviços Editoriais Ltda. 260 p.

Carvalho AV, Marçal MA, Silva PA, Assis GT, Ascheri JL. 2009. Caracterização tecnológica de extrusados de terceira geração à base de farinhas de mandioca e pupunha. Ciênc. agrotec., Lavras, 34 (4): 995-1003.

Carvalho RV, Ascheri JL, Cal Vidal J. 2002. Efeito dos parâmetros de extrusão nas propriedades físicas de extrusados (3G) de misturas de farinhas de trigo, arroz e banana. Ciênc. Agrotec. 26 (5): 1006-1018.

Cherbut C. 2002. Inulin and oligofructose in the dietary fibre concept. British Journal of Nutrition 87 (2): 159-162.

Corradini E, Teixeira E, Marcondes JA, Capparelli LH. 2007. Amido Termoplástico. Embrapa Instrumentação Agropecuária. São Carlos, SP, Brasil. 27 p.

Danty J, Ochagavía A. 2007. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Situación y perspectivas de mercado de la avena (en línea). Consultado 28 de agosto de 2015. Disponible en <http://www.odepa.cl/mobile-inicio/mobile-detalle-publicacion/?idContenido=43910>

Dias MC. 2007. Manipulação da composição química do milho: impacto na indústria e na saúde humana (en línea). Consultado el 30 de marzo de 2016. Disponible en http://www.infobibos.com/Artigos/2008_4/Milho/Index.htm

Dogan H, Karwe MV. 2003. Physicochemical properties of quinoa extrudates. Food Science and Technology International 2: 101-114.

EUFIC. 2016. The European Food Information Council (en línea). Consultado el 4 de abril de 2016. Disponible en <http://www.eufic.org/page/es/page/FAQ/faqid/biscuits-snack/>

Eyidemir E, Hayta M. 2009. The effect of apricot kernel flour incorporation on the physicochemical and sensory properties of noodle. African Journal of Biotechnology 8 (1): 85-90.

FAO. 1990. Utilización de alimentos tropicales: cereales. Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 133 p.

FAO. 2013. Quinoa. Plataforma de información de la quinoa (en línea). Consultado el 31 de marzo de 2016. Disponible en <http://www.fao.org/quinoa/es/>

- FAO. 2015. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Quinoa (en línea). Consultado 28 de agosto de 2015. Disponible en <http://www.fao.org/quinoa/es/>
- FAOSTAT. 2015. Filtros, producción, cultivos (en línea). Consultado el 31 de marzo de 2016. Disponible en <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/S>
- Garcia C. 2007. Nutritotal, o que é inulina (en línea). Consultado el 4 de abril de 2016. Disponible en <http://www.nutritotal.com.br/perguntas/?acao=bu&categoria=26&id=423>
- Grausgruber H, Scheiblaue J, Schönlechner R, Ruckebauer P, Berghofer E. 2004. Variability in chemical composition and biologically active constituents of cereals. *Genetic Variation for Plant Breeding*: 23-26.
- Gutkoski LC, El-Dash AA. 1997. Caracterização química e nutricional de frações de moagem de aveia. *Arq Biol Tecnol* 40: 121–134.
- Gutkoski LC, El-Dash AA. 1999. Effect of extrusion process variables on physical and chemical properties of extruded oat products. *Plant Foods for Human Nutrition* 54 (4): 315-325.
- Haver & Boecker 2010. Test Sieve Shakers. Parts & Operation Manual (en línea). Consultado 25 de agosto de 2015. Disponible en http://wstyler.com/includes/uploads/ro-tap/OPERATIONS_MANUAL_2013_revised.pdf
- León O, Montero I. 2000. Cómo explicar el concepto de interacción sin estadística: análisis gráfico de todos los casos posibles en un diseño 2 x 2. *Psicothema* 13 (1): 159-165.
- Marsaro AL, Lazzari SM, Figueira EL, Hirooka EY. 2005. Inibidores de Amilase em Híbridos de Milho Como Fator de Resistência a *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Neotropical Entomology* 34(3):443-450.
- Mercier C, Feillet P. 1975. Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products. *Cereal Chemistry* 52 (3): 283-297.
- Moura L. 2012. Caracterização físico-química e reológica de farinhas mistas pré-gelatinizadas de arroz, milho e feijão por extrusão termoplástica [Disertación]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-Rio de Janeiro. 105 p.
- Nascimento EM. 2010. Elaboração de produtos de milho enriquecidos com grãos e torta semi-desengordurada de gergelim por extrusão termoplástica [Disertación]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-Rio de Janeiro. 119 p.
- Olagnero G, Abad A, Bendersky S, Genevois C, Granzella L, Montonati M. 2007. Alimentos funcionales: fibra, prebióticos, probióticos y simbióticos. *DIAETA* 25 (121): 20-33.

Onwulata CI, Thomas AE, Cooke PH, Phillips JG, Carvalho CW, Ascheri JL, Tomasula PM. 2010. Glycemic potential of extruded barley, cassava, corn, and quinoa enriched with whey proteins and cashew pulp. *International Journal of Food Properties* 13: 338–359.

Pérez C. 2015. Benefícios y propiedades de la avena (en línea). Consultado 28 de agosto de 2015. Disponible en <http://www.natursan.net/beneficios-y-propiedades-de-la-avena/>

Producción Mundial Maíz. 2015. Maíz Producción Mundial 2015/2016 (en línea). Consultado 27 de agosto de 2015. Disponible en <https://www.produccionmundialmaiz.com/>

Rocha G. 2009. Obtenção e Caracterização de Filmes Biodegradáveis a partir de Misturas de Amido de Mandioca e Extrato Protéico de Soja [Disertación]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-Rio de Janeiro. 75 p.

Ruano JA. 2013. Desenvolvimento e caracterização de bioplásticos de amidos por extrusão termoplástica e termoprensagem [Tesis]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-Rio de Janeiro. 175 p.

Santos A. 2013. Cores Lab Ventajas y Desventajas (en línea). Consultado 27 de agosto de 2015. Disponible en <https://adelossantos.wordpress.com/2013/06/30/cores-lab-ventajas-y-desventajas/>

Shukla R, Cheryan M. 2000. Zein: the industrial protein from corn. *Industrial Crops and Products* 13 (3): 171-192.

Silva EM. 2007. Produção de macarrão pré-cozido à base de farinha mista de arroz integral e milho para celíacos utilizando o processo de extrusão [Disertación]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-Rio de Janeiro. 102 p.

Steel CS, Vernaza MG, Schmiele M, Ferreira RE, Chang YK. 2012. Thermoplastic Extrusion in Food Processing. In Tech. University of Campinas Brazil. 26 p.

Tan J, Gao X, Hsieh F. 1994. Extrudate characterization by image processing. *Journal of Food Science* 59 (6): 1247-1250.

Teba C. 2014. Desenvolvimento e caracterização de farinhas mistas extrudadas de arroz e concentrado proteico de soro de leite bovino para a elaboração de biscoitos e mingaus [Tesis]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-Rio de Janeiro. 192 p.

Thompson DR. 1982. Response surface experimentation. *Journal of Food Process and Preservation* 6: 155 p.

Vargas JW. 2013. Obtenção e caracterização de farinha extrudada de diferentes genótipos de sorgo para o desenvolvimento de biscoitos doces [Disertación]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-Rio de Janeiro. 110 p.

Vidal MC. 2008. Alimentos Funcionales. Catedrática de Nutrición y Bromatología. Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona (en línea). Consultado 26 de agosto de 2015. Disponible en http://www.fundacionmhm.org/www_humanitas_es_numero24/articulo.pdf

WCP (World corn production) 2015. World corn production 2015/2016 (Previous year) (en línea). Consultado el 29 de julio de 2016. Disponible en <https://www.worldcornproduction.com/previous-year.asp>

WG (Whole Grains) 2013. Fiber in Whole Grains (en línea). Consultado el 29 de marzo de 2016. Disponible en <http://wholegrainscouncil.org/whole-grains-101/fiber-in-whole-grains>

7. ANEXOS

Anexo 1. Resultados de análisis físicos en los tratamientos de la mezcla de maíz, quinua y avena.

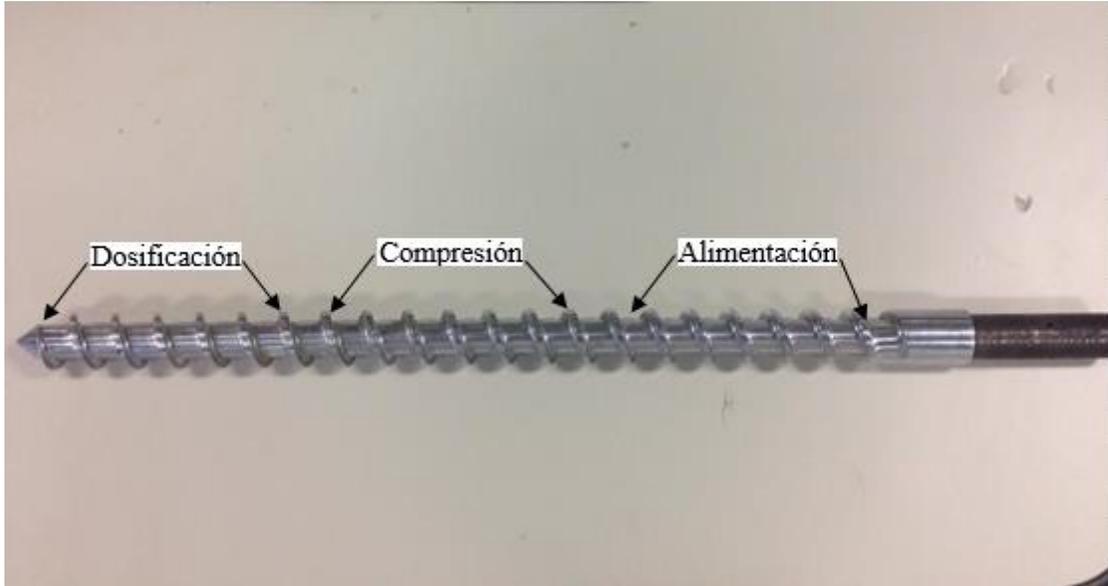
Ensayo	X ₁	X ₂	ISA±σ	IAA±σ	IER±σ	L*±σ	a*±σ	b*±σ
1	-1 (112)	-1 (126)	2.62 ± 0.09 bcd	5.17 ± 0.23 a	1.71 ± 0.15 b	42.39 ± 0.06 g	11.97 ± 0.06 bc	26.55 ± 0.08 f
2	-1 (112)	1 (154)	3.07 ± 0.20 a	5.16 ± 0.34 a	2.58 ± 0.47 a	39.71 ± 0.04 h	10.39 ± 0.02 fg	23.80 ± 0.03 g
3	1 (168)	-1 (126)	2.96 ± 0.15 abc	5.59 ± 0.26 a	1.42 ± 0.26 cd	56.31 ± 0.23 a	10.17 ± 0.30 g	29.12 ± 0.43 cd
4	1 (168)	1 (154)	3.13 ± 0.27 a	5.66 ± 0.38 a	1.29 ± 0.13 d	48.87 ± 0.11 f	12.51 ± 0.16 ab	30.36 ± 0.20 b
5	-α (100)	0 (140)	3.28 ± 0.10 a	4.30 ± 0.21 b	1.60 ± 0.33 bc	42.43 ± 0.09 g	12.96 ± 0.16 a	27.19 ± 0.31 ef
6	α (180)	0 (140)	3.01 ± 0.24 ab	5.69 ± 0.31 a	1.32 ± 0.15 cd	52.23 ± 0.07 b	11.85 ± 0.11 cd	33.11 ± 0.13 a
7	0 (140)	-α (120)	2.53 ± 0.21 cd	5.65 ± 0.14 a	1.51 ± 0.16 bcd	52.54 ± 0.26 b	11.40 ± 0.37 cde	29.67 ± 0.67 bcd
8	0 (140)	α (160)	2.49 ± 0.21 bcd	5.62 ± 0.35 a	1.44 ± 0.13 bcd	49.63 ± 0.13 e	11.68 ± 0.18 cd	29.85 ± 0.29 bc
9(C)	0 (140)	0 (140)	2.44 ± 0.03 d	5.72 ± 0.49 a	1.51 ± 0.16 bcd	51.31 ± 0.06 c	10.96 ± 0.10 ef	28.75 ± 0.11 d
10(C)	0 (140)	0 (140)	2.24 ± 0.11 d	5.45 ± 0.33 a	1.48 ± 0.13 bcd	50.83 ± 0.29 d	10.35 ± 0.35 g	27.26 ± 0.58 ef
11(C)	0 (140)	0 (140)	2.52 ± 0.092 cd	5.86 ± 0.462 a	1.59 ± 0.223 bc	48.71 ± 0.120 f	11.31 ± 0.150 de	27.64 ± 0.270 e

X₁= Temperatura de la tercera zona de la extrusora (°C), X₂= Velocidad de rotación del tornillo (rpm), ± α= ± 1.414

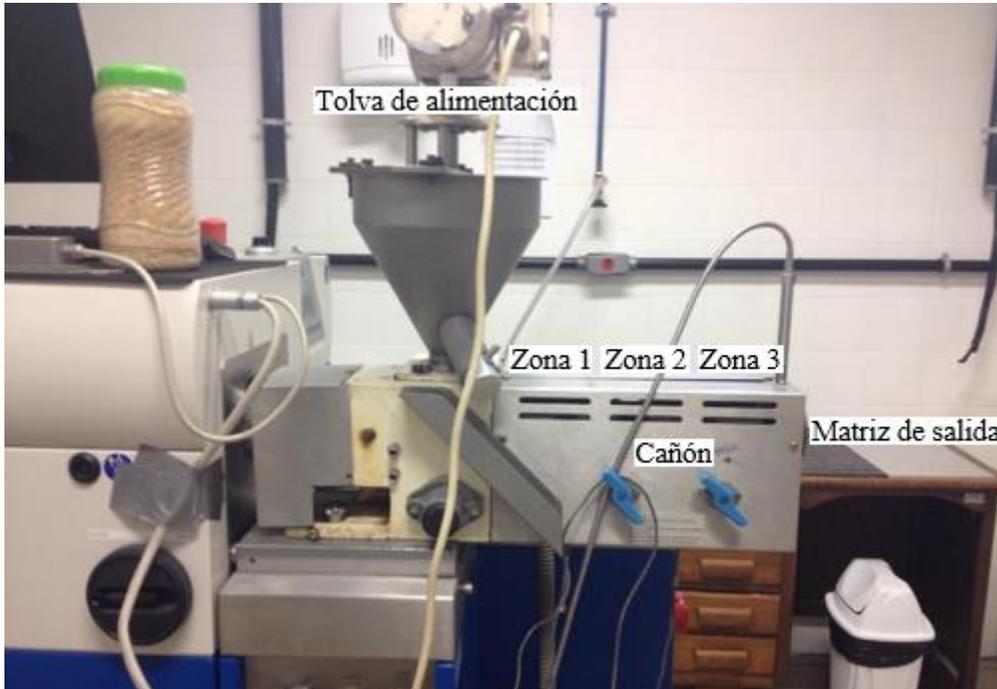
Anexo 2. Formulación de la galleta de maíz, quinua y avena.

Ingrediente	Cantidad
Harina de trigo	600 g
Harina de maíz, quinua y avena	400 g
Azúcar	250 g
Margarina	200 g
Miel glucosa	100 ml
Inulina	80 g
Lecitina de soya	50 ml
Bicarbonato de sodio	20 g
Ácido láctico	10 ml
Aroma líquido	10 ml

Anexo 3. Configuración de las zonas del tornillo 3:1 de la extrusora Brabender, modelo DSE 20 DN.



Anexo 4. Extrusora Brabender, modelo DSE 20 DN.



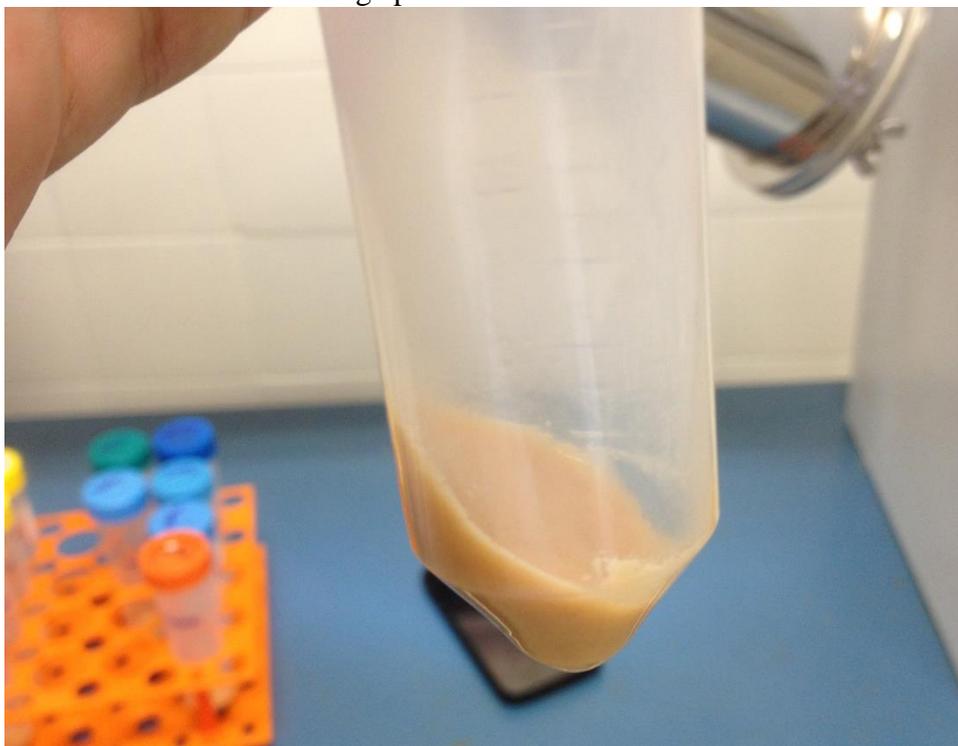
Anexo 5. Extruidos de maíz, quinua y avena.



Anexo 6. Matriz de salida circular de 3 mm.



Anexo 7. Tubos de centrifuga para hacer análisis de ISA e IAA.



Anexo 8. Elaboración de galletas.



Anexo 9. IER del extruido de maíz.

Promedio	3.252981
Desv. Est	0.484402

Anexo 10. Fórmula para calcular energía mecánica específica (EME) y regresión lineal.

$$EME = \frac{T\omega}{\dot{m}} \quad Y_i = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{12}X_1X_2 + \varepsilon$$