

**Caracterización físicoquímica y reológica de  
harinas mixtas pregelatinizadas de quinua,  
frijol caupí y arroz parbolizado por extrusión  
termoplástica**

**Fernanda Katherine Álvarez Vinueza**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano**

**Honduras**

Noviembre, 2016

ZAMORANO  
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

# **Caracterización físicoquímica y reológica de harinas mixtas pregelatinizadas de quinua, frijol caupí y arroz parbolizado por extrusión termoplástica**

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

Presentado por

**Fernanda Katherine Álvarez Vinueza**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2016

# Caracterización físicoquímica y reológica de harinas mixtas pregelatinizadas de quinua, frijol caupí y arroz parbolizado por extrusión termoplástica

Fernanda Katherine Álvarez Vinuesa

**Resumen:** La extrusión termoplástica es un proceso que provoca alteraciones en el alimento tales como: pregelatinización, homogeneización, desnaturalización de proteínas, plastificación y expansión de la estructura del alimento. Ésta investigación evaluó la mezcla de tres ingredientes quinua 20%, frijol caupí 15%, arroz parbolizado 65% a una humedad inicial 16% para la obtención de una harina mixta parcialmente pregelatinizada. Se estudió el efecto de las variables independientes rotación de tornillo (rpm) y temperatura en la tercera sección del extrusor (°C) con la utilización del diseño de tipo factorial Compuesto Central Rotacional de segundo orden. Se evaluaron cuatro puntos axiales, cuatro factoriales y cuatro centrales obteniendo doce tratamientos. Se alcanzaron modelos predictivos ( $p > 0.60$ ) para Índice de expansión radial (IER), Índice de solubilidad en agua (ISA), Índice de absorción en agua (IAA), propiedades viscoamilográficas y en análisis de color para: a, b, y  $\Delta E$ . Se realizó análisis de imagen por escáner para delimitar los poros de expansión y se observó también, por microscopio electrónico de barrido (MEB) los cambios sufridos por la materia prima sometida a extrusión. Se concluyó que es posible pregelatinizar harinas mixtas a partir del diseño propuesto. Adicionalmente, se obtuvo valores óptimos para las variables independientes de 154 °C Y 320.7rpm. Finalmente, se recomendó dislocar los valores de temperatura y rotación hacia los valores más óptimos.

**Palabras clave:** *Chenopodium quinoa*, extrusora monotornillo, precocimiento de harinas, superficie de respuesta, *Vigna unguiculata*.

**Abstract:** The thermoplastic extrusion is a process that causes changes in food such as pregelatinization, homogenization, protein denaturation, plastification and expansion of food's structure. This research evaluated three mixing ingredients quinoa 20%, cowpea 15%, parboiled rice 65% to 16% of initial moisture to obtain a partially pregelatinized mixed flour. The effects of independent variables were studied screw rotation (rpm) and temperature in the third section of the extruder (°C) with the use of the factorial design Central Composite Rotational of second order. Were evaluated four axial points, four factorials and four central points obtaining 12 treatments. Were reached predictive models ( $P > 0.60$ ) for Index radial expansion (IER), Index solubility in water (ISA), Index absorption in water (IAA), viscoamilographic properties and color analysis for a, b, and  $\Delta E$ . Image analysis was scanned to delimit the pores of expansion and the changes in the extruded raw matter were also observed by scanning electron microscope (SEM). In conclusion, it is possible to pregelatinize mixed flour from the proposed design. Additionally, optimum values were obtained for the independent variables of 154 °C and 320.7 rpm. Finally, it is recommended to dislocate the temperature values and rotation to the optimal values.

**Keywords:** *Chenopodium quinoa*, flour pre-cooking, response surface, single-screw extruder, *Vigna unguiculata*.

## CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Contenido .....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>48</b>
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>49</b>
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>50</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>54</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros		Página
1.	Descripción de los valores reales utilizados en el diseño compuesto central rotacional. ....	6
2.	Descripción de los valores codificados y reales de las variables en el diseño compuesto central rotacional. ....	7
3.	Datos de las variables independientes y las variables dependientes de todos los tratamientos realizados a la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). ....	17
4.	Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Índice de expansión radial (IER) de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). ....	19
5.	Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Índice de solubilidad en agua (ISA) de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). ....	23
6.	Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Índice de absorción en agua (IAA) de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). ....	25
7.	Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Viscosidad máxima a frío de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). ....	27
8.	Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Viscosidad máxima de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). ....	29
9.	Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Viscosidad mínima en el enfriamiento de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). ....	30

Cuadros	Página
10. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Temperatura de quiebra de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). .....	32
11. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Tendencia a retrogradación de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). .....	34
12. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Viscosidad final de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). .....	35
13. Resultados de la caracterización física del color de las materias prima, harinas pregelatinizadas, granos enteros de la materia prima y harinas similares en el mercado del Ecuador .....	38
14. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Luminosidad en CIE Lab de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). .....	39
15. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la cromaticidad a* en CIE Lab de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). .....	41
16. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la cromaticidad b* en CIE Lab de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). .....	43
17. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en Diferencia de color en CIE Lab de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm). .....	44
18. Análisis centesimal del tratamiento 7 en comparación con una muestra de harina mixta cruda. ....	52

Figuras	Página
1. Distribución de los tratamientos en el diseño central compuesto rotacional.....	7
2. Extrusor de tornillo único señalando las partes más importantes y las tres zonas de calentamiento. ....	9

Figuras	Página
3. Mapa conceptual del proceso de extrusión de la harina mixta cruda a harina mixta precocida parcialmente soluble de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado. ....	11
4. Amilograma obtenido con arroz al 12% de humedad (p/v) en el RVA modificado (Carvalho <i>et al.</i> 2011).....	14
5. El cúbico CIE Lab en el espacio de color (Shukla 2009).....	15
6. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Índice de expansión radial de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	19
7. Corte transversal de los tratamientos expandidos de la harina mixta de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado procesados en diferentes condiciones de rotación de tornillo y temperatura de la tercera sección de del extrusor monotornillo. ....	22
8. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Índice de solubilidad en agua de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	24
9. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Índice de absorción en agua de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	25
10. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Viscosidad máxima a frío de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	27
11. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Viscosidad máxima de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	29
12. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Viscosidad mínima en el enfriamiento de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado). ....	31
13. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre la Temperatura de quiebra de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	33
14. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo, sobre el Tendencia a retrogradación de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).	34
15. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo, sobre el Viscosidad final de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	36
16. Microfotografías usando el microscopio electrónico de barrido (ampliación 2000x) de harina mixta cruda (derecha) y tratamiento 2 (izquierda). ....	37
17. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo, sobre la Luminosidad en color de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado). ....	39
18. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre la Cromaticidad a* de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	41

Figuras	Página
19. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre la cromaticidad b* de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	43
20. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre la Diferencia de color de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).....	45
21. Valores óptimos de las variables independientes sobre el la temperatura y la rotación de tornillo para la obtención de harina mixta pregelatinizada de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado. ....	46

Anexos	Página
1. Extrusor de tornillo único, Marca Brabender, Modelo 670237.001 (Alemania).	54
2. Anáñisis centesimal del tratamiento 7 .....	55
3. Extruido de harina mixta compuesta de quinoa, frijol caupí y arroz parbolizado saliendo del extrusor con matriz de 3mm.	56
4. Tratamientos listos para ser secados en horno Elka a 50°C, posteriores a la extrusión termplástica.....	57
5. Molino de disco de marca Laboratory Mill 3600 .....	57
6. Molino de disco de marca Laboratory Mill 3100 .....	58
7. Rotap en movimiento, modelo: Rx-29, junto con los tamices de diferentes aberturas de diámetro de malla.....	58
8. Balanza determinadora de humedad por infrarrojo marca Moisture Balance MOC-120-H .....	59
9. Parámetros de extrusión, bitácora de Laboratorio de cereales, Planta 4, Embrapa, Agroindustria de Alimentos .....	60
10. Dispositivo en funcionamiento de Rapid Visco Analyser, lectura del tratamiento 5.....	61
11. Centrifugadora marca Hehich, modelo universal 320R, Alemania, Lista para funcionar utilizada en el análisis de ISA e IAA .....	61
12. Tratamientos listos para ser sometidos a centrifugación para la determinación de ISA e IAA .....	62
13. Tratamientos después de ser centrifugados y retirado la parte soluble en agua, para determinación de ISA. ....	62
14. Materia prima, de izquierda a derecha frijol caupí, arroz parbolizado y quínoa.	63
15. Valores óptimos de las variables independientes sobre el la temperatura y la rotación de tornillo para la obtención de harina mixta pregelatinizada de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado. ....	64
16. Fotografías de Microscopio electrónico de Barrido .....	66
17. Perfil de viscosidad de pasta de todos los tratamientos planteados.....	78

## 1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de quinua en Ecuador se concentra en la sierra del país, con una superficie cultivada de 7.488 Ha, en la actualidad su producción se distribuye geográficamente en cinco provincias: Pichincha, Carchi, Imbabura, Cotopaxi y Chimborazo (Peralta 2009). A pesar de su alto contenido de aminoácidos, ácidos grasos esenciales y minerales; el consumo de éste pseudocereal en el país alcanza únicamente 1 kg per cápita al año, razón por la cual, el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) fomenta su cultivo mediante la purificación de la semilla y distribución directa de una variedad en especial, la variedad Tunkahuan, obtenida por el Instituto Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) (Nieto *et al.* 1992).

Paralelamente, una de las leguminosas más sobresalientes es el frijol caupí (*Vigna unguiculata*) con alto valor biológico, originaria de África, cultivado ampliamente en América debido a su fácil adaptación a climas secos, suelos ácidos y a su precocidad (López 2012). En Ecuador se produce principalmente en las regiones del oriente y la costa; la importancia económica de este cultivo radica en la adaptabilidad a las condiciones tanto de primavera como verano y en su alto coeficiente de multiplicación, lo que, sumado al elevado contenido de lisina, convierte al frijol caupí, no sólo en una fuente importante de proteína para la nutrición humana, sino también en un cultivo rentable para el productor (INIAP 2005).

De igual importancia el arroz forma parte importante de la dieta diaria del pueblo ecuatoriano y por lo tanto su cultivo, según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), abarca el 15,34% del área total de superficie sembrada, convirtiéndose de esta manera en el tercer producto con mayor superficie sembrada (Moreno 2015). El arroz parbolizado, término que proviene del inglés “*partial boiling*”, es decir vaporizado; es un tipo de arroz con cáscara que ha sufrido un proceso hidrotérmico cuyo objetivo principal es modificar las características del grano sobre la base de la gelatinización parcial o total del almidón contenido en el endospermo (Bello 2009). El proceso para la obtención de este tipo de arroz consta de tres etapas: Hidratación del grano, gelatinización (parbolizado) y secado; las principales ventajas nutricionales que ofrece este producto son: mayor aporte nutricional ya que las vitaminas y minerales se fijan en su interior, mejora el rendimiento en la molienda minimizando el número de granos quebrados y se obtiene un producto apetecido por el consumidor con diferentes características al arroz tradicional (Salazar 2013).

Dentro del marco del cambio de la matriz productiva del país y siguiendo de cerca el Programa Mundial de Alimentos desarrollado por las Naciones Unidas, el gobierno local ha invertido tiempo y recursos en la creación de cadenas de valor de los productos nacionales, para que de esta manera el país deje de producir bajo un sistema primario exportador de materias primas y se convierta en un país fabricante de productos terminados

(ProEcuador 2015). Las harinas mixtas pregelatinizadas son alimentos fortificados de reconstitución instantánea, cuyo principal objetivo es mantener la calidad nutricional y aportar a la seguridad alimentaria de la población; están elaborados a partir de cereales locales como la quinua, el arroz, y en el caso del presente estudio, el frijol caupí (Coello 2011).

Las harinas pregelatinizadas se pueden obtener por diversos tratamientos hidrotérmicos, sin embargo, el tratamiento más versátil es la extrusión termoplástica, la cual conjuga la aplicación de calor y esfuerzo mecánico a una mezcla de harina y agua; este proceso mejora las características nutricionales del producto, reduce la oxidación lipídica, incrementa el contenido de fibra soluble y reduce la carga microbiana (Camire *et al.* 1990). Los parámetros operativos del proceso de extrusión como la temperatura, velocidad del tornillo sin fin, humedad, presión; no son únicamente importantes en el ámbito nutricional, sino que también tienen gran relevancia sobre las propiedades funcionales de las harinas y en particular las modificaciones que sufre el almidón (Ferreira *et al.* 2014). Un aspecto nutricional importante que se ve favorecido por el proceso de extrusión es el incremento de la biodisponibilidad del almidón, aunque pueden existir fracciones de almidón retrogradado que resiste la acción de las enzimas digestivas y que se comporten como fibra dietética (Pérez *et al.* 2007).

Debido al daño que sufren los gránulos de almidón durante la extrusión, algunas de las propiedades reológicas de las harinas mixtas se ven modificadas por ejemplo la solubilización se ve favorecida gracias a que las moléculas de amilosa y amilopectina son de menor tamaño como consecuencia de las fuerzas de cizalla a las que se somete durante el proceso de extrusión (Martínez 2012). En concordancia, los almidones que sufrieron un tratamiento térmico presentan mayor cantidad de sitios de adsorción disponibles para formar puentes de hidrógeno con el agua y por lo tanto son más solubles en agua fría (Lima *et al.* 2012). Sin embargo, las harinas que presentan gran cantidad de sitios de adsorción se convierten en productos higroscópicos en determinadas condiciones de temperatura y actividad de agua; por lo tanto, las condiciones de almacenamiento y el tipo de empaque deben ser las adecuadas para garantizar la calidad y el tiempo de vida útil del producto (García y Martínez 2006). Existen también, otras modificaciones químicas y cambios estructurales después de la extrusión como son la desnaturalización de las proteínas (Guy 2001), la formación de complejos entre macromoléculas y otras reacciones. Éstos cambios permiten obtener productos de diferentes calidades (Yu y Wang 2007).

Así, considerando que las harinas y mezclas de harinas sufren variaciones después del proceso de extrusión es necesario estudiar las propiedades reológicas de los productos extruidos. Esto se debe a que como consecuencia del proceso algunas características del producto se pueden ver afectadas y por lo tanto es importante determinar los cambios que sufren dichas propiedades en relación al comportamiento de las harinas por la temperatura y cizallamiento, y por su parte la estabilidad de las harinas, en función del tiempo, temperatura y humedad (Ferreira *et al.* 2014).

En el presente trabajo se establecieron los porcentajes de materia prima basándose en la cantidad de almidón y de fibra que contiene cada material seleccionado. Teniendo en cuenta que, a mayor cantidad de almidón y menor fibra alimentaria va a existir una mayor

transformación del material extruido, también se tomó en cuenta la humedad inicial de la harina inicial (Ascheri *et al.* 2010). Con estos parámetros se establecieron los siguientes objetivos para una harina pregelatinizada:

- Desarrollar a través de la extrusión termoplástica una harina mixta pregelatinizada a partir de quínoa, arroz parbolizado y frijol caupí.
- Analizar los efectos de los parámetros de extrusión en las propiedades físicas y reológicas de los extruidos a través de Índice de expansión radial, Índice de solubilidad en agua, Índice de absorción en agua, propiedades viscoamilográficas, análisis de color, análisis de imagen con escaner y MEB.
- Establecer el mejor perfil de procesamiento en las condiciones propuestas para la obtención de harina mixta pregelatinizada con una humedad inicial de 16% y considerando como variables para la extrusión la temperatura en la tercera sección del cañón de la extrusora y la rotación del tornillo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización.** El desarrollo y caracterización física, química y reológica de todos los tratamientos se realizó en los laboratorios de la Planta Piloto de Cereales de Embrapa Agroindústria de Alimentos. Este centro de investigación está ubicado en Av. das Américas, 29501 - Guaratiba, Rio de Janeiro - RJ, 23020-470, Brasil.

**Materia Prima.** Las materias primas que se usaron para la realización de las harinas pregelatinizadas fueron: quinoa comercial de variedad Tunkahuan (INIAP) previamente tratada (desaponificado) y decorticada, arroz parbolizado marca Qualidade (clase largo fino-Tipo 1) obtenidos en el comercio de Rio de Janeiro, frijol caupí proporcionado por Embrapa Agroindústria de Alimentos.

### Métodos.

**Producción de la harina mixta de quinoa, frijol caupí y arroz parbolizado.** La harina mixta fue realizada con diferentes porcentajes de su materia prima: quinoa 20%, frijol caupí 15%, arroz parbolizado 65%. Los tres ingredientes fueron mezclados manualmente en una bolsa plástica durante 10 minutos antes de procesarlos en el molino de disco de marca Perten Laboratory Mill 3600 con una abertura de nivel dos en el disco.

**Diseño experimental.** Los niveles utilizados y los ensayos del diseño factorial se muestran en los cuadros 1 y 2, respectivamente. Éstas muestran el estudio de los efectos de la extrusión para la producción de harinas mixtas instantáneas de quinua, frijol caupí y arroz parbolizado.

Dentro de las variables independientes se seleccionaron: temperatura de proceso en la zona 3 del extrusor (°C) y rotación del tornillo (rpm). Con el objetivo de evaluar el efecto combinado de las variables mencionadas en las características físicas y reológicas se realizó un diseño factorial del tipo Compuesto Central Rotacional (DCCR) de 2<sup>do</sup> orden que pertenece a la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) con 10% de orden de probabilidad (Box y Huenter & Huenter 1978). Se realizaron 12 tratamientos distribuyéndose de la siguiente manera: cuatro ensayos factoriales, cuatro ensayos axiales y cuatro ensayos centrales.

La Metodología de Superficie de Respuesta es una técnica matemática que ayuda a resolver, modelar y optimizar mediante modelos influenciados por una variable o varias variables en los atributos evaluados. Con esta metodología se pueden determinar las condiciones óptimas para un sistema (Peregrina 2000).

Existen tres niveles codificados ( $\pm 1, 0, \pm\alpha$ ) como parámetros de proceso establecido como variables independientes (Ecuación 3):

$$x_i = \frac{X_i - Z}{\Delta x_i} \quad [1]$$

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

$\Delta x_i$ : valor de intervalo de variación de  $x_i$

Las variables codificadas axiales fueron  $-\alpha$  y  $\alpha$ . En donde valor de  $\alpha$  es el número factorial del diseño ( $F=2^k$ ) y el número de variables independientes ( $K=2$ ) (Ecuación 2).

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

La cantidad de tratamientos se dieron en base a experimento factorial completo (Ecuación 3):

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

Donde:

$2^k$ : número de puntos factoriales

$2k$ : número de puntos axiales

$M$ : repeticiones del punto central

Los valores máximos y mínimos de cada variable independiente se establecieron basados en pruebas preliminares desarrolladas en Embrapa, Agroidústria de Alimentos. Para analizar los resultados experimentales, la metodología detalla el comportamiento de variables independientes ( $X_k$ ) y su efecto que tienen sobre las variables dependientes o respuesta ( $Y_i$ ). Box y Draper (1967) y Rocha (2009) especifican que la respuesta es una función donde se mezclan y definen estos factores (Ecuación 4).

$$Y_i = F(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad [4]$$

Con un análisis de regresión lineal se ajusta para cada respuesta ( $Y$ ) un polinomio de segundo orden con las variables explicativas ( $X_k$ ). Esta es usada para predecir de forma general el comportamiento de cada repuesta (Ecuación 5).

$$Y_i = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{12}X_1X_2 + \varepsilon \quad [5]$$

Donde:

$Y_i$ : función respuesta

$B_0$ : coeficiente relativo a la interpretación del plan con la respuesta en el eje

$X_1, X_2$ : valores de las variables independientes

$B_1, B_2$ : coeficientes lineales estimados por el mínimo cuadrado

$B_{11}, B_{22}$ : coeficiente de la variable cuadrática

$B_{12}$ : coeficiente de interacción entre las variables independientes  
 $\varepsilon$ : error experimental

Los valores reales de los niveles codificados pueden ser: factoriales ( $\pm 1$ ), axiales ( $\pm \alpha$ ) y centrales (0), (Cuadro 1). La matriz de los ensayos generado por el Diseño Compuesto Central Rotacional (DCCR) y los niveles codificados (Cuadro 2 y Figura 1).

Cuadro 1. Descripción de los valores reales utilizados en el diseño compuesto central rotacional.

Variables independientes	Valores codificados				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
X <sub>1</sub> : Revoluciones por minuto (rpm)	179.3	200.0	250.0	300.0	320.7
X <sub>2</sub> : Temperatura de sección 3ra del extrusor (°C)	100.4	112.0	140.0	168.0	179.6

En total se realizaron 12 tratamientos y se distribuyeron de la siguiente manera: Puntos factoriales cuatro, puntos axiales cuatro y cuatro repeticiones para el punto central (Cuadro 2).

Cuadro 2. Descripción de los valores codificados y reales de las variables en el diseño compuesto central rotacional.

Tratamiento	Valores codificados		Valores reales	
	A	B	Temperatura (°C)	Rotación (rpm)
1	- 1.00	- 1.00	112.00	200.00
2	- 1.00	1.00	112.00	300.00
3	1.00	- 1.00	168.00	200.00
4	1.00	1.00	168.00	300.00
5	- 1.41	0.00	100.40	250.00
6	1.41	0.00	179.60	250.00
7	0.00	- 1.41	140.00	179.29
8	0.00	1.41	140.00	320.71
9	0.00	0.00	140.00	250.00
10	0.00	0.00	140.00	250.00
11	0.00	0.00	140.00	250.00
12	0.00	0.00	140.00	250.00

Temperatura (°C): Temperatura de la tercera zona del extrusor en °C.

Rotación (rpm): Rotación del tornillo en revoluciones por minuto (rpm)

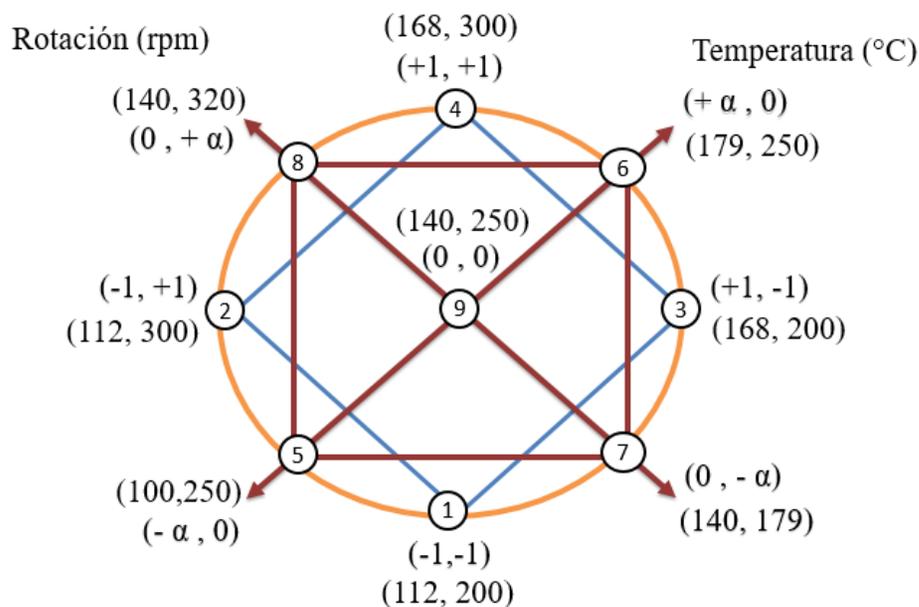


Figura 1. Distribución de los tratamientos en el diseño central compuesto rotacional.

**Análisis estadístico.** Los resultados del DCCR se evaluaron utilizando el programa Statistica 7.0<sup>®</sup>. El modelo fue comprobado con el uso de una prueba de varianza (ANOVA) y la prueba de distribución F (10% de probabilidad). Se dice que el modelo de regresión es

significativo si el valor del F calculado supera al F tabulado, en tanto mayor sea el resultado de valor F calculado más predictivo es el modelo (Box y Wetz 1973).

El modelo polinomial fue comprobado al comparar la proporción de variación del coeficiente de determinación ( $R^2$ ). El modelo será predictivo si el coeficiente de determinación está sobre 0.6 debajo de éste parámetro será tendencioso (Teba 2009). El porcentaje obtenido en  $R^2$  muestra la atribución que se les da a las variables para obtener ese coeficiente, el porcentaje sobrante es el que se atribuye a otras variables.

Los gráficos de superficie de respuesta se diseñaron con la ayuda del programa Statistica 7.0<sup>®</sup>. Esto se logró con los modelos matemáticos obtenidos a partir de los valores reales de las variables independientes estudiadas. Los valores codificados fueron usados para realizar las regresiones matemáticas.

Las respuestas se expresaron para las variables dependientes en base al eje Z, y para las variables dependientes representando el eje X y Y. Se conservó las otras variables constantes en el punto central con el nivel codificado 0.

En el caso del análisis de regresión del modelo polinomial de segundo orden de variables independientes se usó la Ecuación 6.

$$Y_i = B_0 + B_n^n \left( \frac{X - Z}{\Delta x_i + \varepsilon} \right) \quad [6]$$

$Y_i$ : función respuesta

$B_0$ : coeficiente relativo de la interpretación del plano con respuesta en el eje  
 $B_n^n$ : coeficiente linear, cuadrático o de interacción determinado por el método de mínimos cuadrados

X: valor decodificado de la variable

Z: valor real de la variable en el punto central

$\Delta x_i$ : valor del intervalo de variación entre el punto central

$\varepsilon$ : error experimental

**Acondicionamiento de las materias primas.** La harina mixta cruda se estableció a 16% de humedad, la misma que fue determinada a través de pruebas preliminares realizadas en la Planta de Cereales de Embrapa Agroindústria de Alimentos. La cantidad de agua a adicionar a la materia prima se calculó con la ayuda de la Ecuación 7 (Instituto Adolfo Autz 1985) para así llegar a una humedad final esperada.

$$Y = \left[ \frac{(U_f - U_i) \times Pa}{100 - U_f} \right] \quad [7]$$

Y = cantidad de agua a ser adicionada (mL)

$U_f$  = humedad final de la muestra (%)

$U_i$  = humedad inicial de la muestra (%)

Pa = peso de la muestra (g)

La cantidad de agua resultante se adicionó (agua potable) despacio a toda la harina mixta y se homogeneizó. Para esto se colocó la harina y el agua en una bolsa de plástico grande y se removió durante 15 minutos hasta deshacer cualquier tipo de terrones formados, posterior a esto se refrigeró durante 24 horas para así obtener una distribución más uniforme del agua (Teba 2014). Al terminar este periodo de tiempo la harina estuvo lista para el proceso de extrusión.

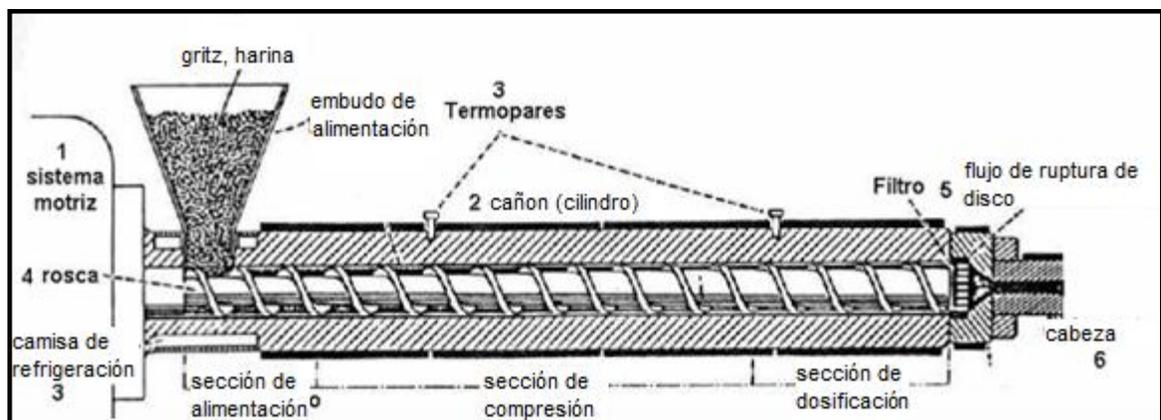
## Proceso de extrusión termoplástica

**Condiciones del proceso.** Se usó la extrusora Brabender, Modelo 670237.001 (GmbH & Co. KG Alemania, Plastic Corde) con tornillo único (monotornillo). Los parámetros de la extrusora que permanecieron constantes fueron:

- Tasa de compresión del tornillo 3:1
- Tasa de alimentación 2.5 Kg
- Matriz de 3 mm de diámetro.

Los parámetros descritos anteriormente se delimitaron de experiencias previas con preliminares en la Planta Piloto IV- Cereales, Embrapa, Agroidustria de Alimentos.

El extrusor posee tres zonas de calentamiento dentro del cilindro, las mismas que se controlan por un termostato y un registrador de presión en la salida de la matriz (Figura 2).



Fuente: <http://mecanicadefabricar.blogspot.com/2015/10/extrusao-plastica.html>

Figura 2. Extrusor de tornillo único señalando las partes más importantes y las tres zonas de calentamiento.

**Extrusión termoplástica.** El equipo fue encendido una hora antes de ser usado para que las temperaturas de las zonas de calentamiento estén listas y no se desperdicie tanto producto al empezar. Se tomó la harina mixta cruda y se la repartió en 12 partes por los 12 tratamientos (Cuadro 2). La extrusión de cada muestra se inició al pasar por las tres secciones de tornillo (alimentación, compresión y alta presión o dosificación) hasta llegar

a la tercera zona de calentamiento y obtener la temperatura deseada para cada tratamiento. También se realizó la extrusión de una porción de griz de maíz como tratamiento guía de los resultados obtenidos con los tratamientos de la harina mixta, ésta extrusión se realizó con el diseño del tratamiento de puntos centrales. La temperatura fue mantenida en 50 °C y 90 °C para la zona uno y dos respectivamente; en el caso de la zona tres varió dependiendo del diseño experimental (Cuadro 2).

Verificando el panel de control con las temperaturas programadas se empezó con el proceso de extrusión. Las muestras se recolectaron en una bandeja previamente limpia, se esperó a que el material recolectado sea homogéneo (sin tener zonas de mayor diámetro que otras). Los extruidos se dejaron reposar hasta el enfriamiento parcial, posterior se embolsó en bolsas de 20×30 cm teniendo cuidado de no romper todos los extruidos ya que se necesitan para el análisis de Índice de Expansión Radial (IER). Se etiquetó cada bolsa con su tratamiento.

Las muestras fueron llevadas a la estufa de marca Elka a 50 °C durante 4 horas (Silva 2007), aquí también se incluye la muestra de maíz extruido con las condiciones de los puntos centrales. Para esta actividad también se tuvo cuidado de no mezclar los extruidos, es decir un tratamiento de otro, etiquetándolos. Al terminar el tiempo en la estufa se sacaron las muestras se dejaron enfriar durante 10 minutos y se embolsaron nuevamente. La Figura 3 muestra el proceso de extrusión.

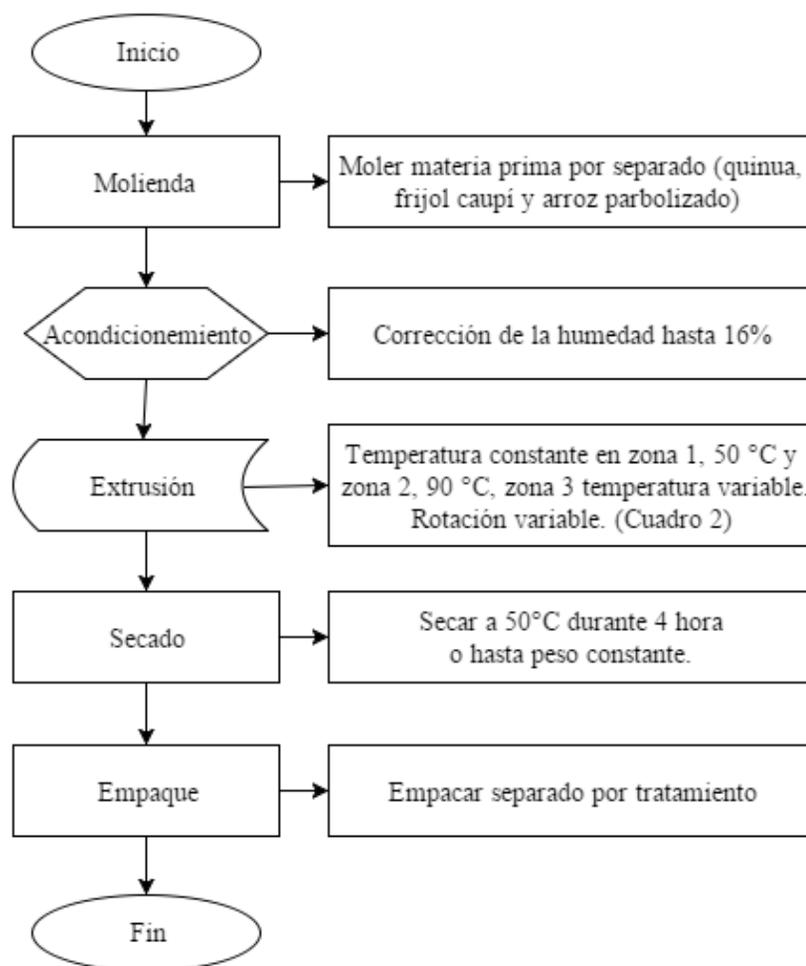


Figura 3. Mapa conceptual del proceso de extrusión de la harina mixta cruda a harina mixta precocida parcialmente soluble de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado.

**Molienda de los tratamientos extruidos.** Para la reducción de la granulometría para los posteriores análisis se procedió a moler cada tratamiento por separado (dejando 50 g intactos de extruido original para IER). Se utilizó el molino de disco de marca Laboratory Mill 3600 en el nivel dos para reducir las hasta un tamaño de partícula ( $>212 \mu\text{m}$ ), después se pasó por otro molino de martillo Laboratory Mill 3100 que redujo más el tamaño de partícula ( $<212 \mu\text{m}$ ). Entre cada tratamiento se realizó una limpieza exhaustiva de cada molino, así se evitó la contaminación de una muestra con otra.

**Separación de partículas por granulometría.** Se realizó la separación por granulometría con el objetivo de obtener un tamaño de partícula entre  $212 - 106 \mu\text{m}$  para el análisis de RVA (*Rapid Visco Analyser*). Para este procedimiento se tomaron tamices con diferentes aberturas de malla ( $212 \mu\text{m}$ ,  $106 \mu\text{m}$  y fondo) se colocaron los tamices uno sobre otro adaptándose al equipo Rotap, model: Rx-29 durante 10 minutos por cada muestra (Silva 2007). Al finalizar la molienda cada tratamiento se colocó en una bolsa impermeable etiquetada.

**Índice de expansión radial (IER).** Es uno de los test más importantes de la caracterización física de los productos extruidos, por este se puede predecir qué tan fuerte o leve fue el proceso de extrusión. Este parámetro también indica si se está obteniendo resultados acordes a los objetivos planteados (Ascheri 2010).

Los IER se calcularon siguiendo la metodología de Alvarez-Martinez *et al.* (1988) (Ecuación 8):

$$IER = \left( \frac{D}{D_0} \right)^2 \quad [8]$$

Donde:

D: diámetro del extruido después de tocar temperatura ambiente

D<sub>0</sub>: diámetro da matriz de la extrusora (matriz radial predeterminado – 3 mm)

Para determinar los diámetros de los extruidos se utilizó paquímetro da marca Misma 6'' 150 mm (São Paulo, SP, Brasil). Se midió en tres puntos distintos de cada extruido y el diámetro resultante de la media de éstos puntos, con un total de 10 repeticiones.

**Evaluación de los tratamientos expandidos por imagen.** Para la obtención de las imágenes de la estructura microscópica de cada tratamiento extruido, se cortó radialmente hasta obtener una superficie que pueda quedarse sostenida por si sola verticalmente. No se lijó la superficie para no dañar las burbujas de aire que se formaron en el extruido. Se utilizó un escaner. Las imágenes fueron ampliadas de forma de permitir una mejor visualización de la estructura celular. La técnica fue propuesta por Tan *et al.* (1994) con modificaciones.

## **Características tecnológicas y funcionales de los extruidos precocidos a base de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado.**

**Índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA).** Al determinar ISA e IAA se siguió la metodología descrita por Anderson *et al.* en 1969 con modificaciones. Se realizó éste procedimiento en cuadruplicado para todos los tratamientos (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

La harina usada tuvo una granulometría de 106-212  $\mu\text{m}$ . Se pesó 1,000 $\pm$ 0.0010 g de muestra en base seca en un tubo de centrífuga limpio, seco y previamente pesado adicionándose aquí 5mL de agua destilada, se mezcló por 20 segundos sobre el agitador tipo Vortex (Genie 2 Industria Científica, Bohemia, NY, USA) y rápidamente se adicionó otros 5 mL para lavar cualquier partícula adherida en la pared del tubo.

Los tubos debidamente cerrados y rotulados de dejaron reposar durante 10 min en temperatura ambiente 25 $\pm$ 5  $^{\circ}\text{C}$ . La mezcla después del reposo fue centrifugada a 9000 rpm a una temperatura de 25  $^{\circ}\text{C}$  durante 15 minutos en una centrífuga Universal (Hehich Zentrufuge, modelo universal 320R, Alemania).

Al terminar de centrifugar se retiró cada tubo y se observaron dos fases muy marcadas. El sobrenadante fue cuidadosamente vertido en un crisol previamente tarado y seco en la estufa ELKA 220 V a 105  $^{\circ}\text{C}$  durante 4 horas para la posterior medición de sólidos solubles totales. El tubo con el gel restante fue pesado para obtener el IAA.

La ecuación utilizada para el cálculo del Índice de Solubilidad en Agua (Ecuación 9) fue propuesto por Dogan y Karwe (2003):

$$ISA = \frac{\text{Peso del residuo evaporado (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 100 \quad [9]$$

Y el cálculo para de Índice de Absorción en Agua (Ecuación 10) fue propuesto por Hashimoto y Grossmann (2003):

$$IAA = \frac{\text{Peso del residuo centrifugado (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 100 \quad [10]$$

**Propiedades viscoamilográficas.** La viscosidad de cada tratamiento fue analizada con el uso de “*Rapid Visco Analyser*” modelo 960648 RVA- 4D de Newport *Scientific, Warrired, NSW, Australia* con un software Termocline (Vargas 2013). El tamaño de partícula utilizado fue de una granulometría de 106-212  $\mu\text{m}$ . Se pesó 3 g de cada tratamiento corregido a una humedad de 16% en base húmeda, posterior se adicionó agua destilada hasta un peso final de 28 g. Cada tratamiento se realizó duplicadamente (Ascheri 2006). Se utilizó el perfil de análisis “extrusión 3” y se caracterizó de la siguiente manera: Inicialmente el sistema se mantiene durante 2 minutos a 25  $^{\circ}\text{C}$ , en los próximos 5 minutos se calienta hasta 95  $^{\circ}\text{C}$  en esta temperatura se mantiene hasta los 10 minutos. Desde los 10 hasta los 15 minutos se produce el enfriamiento hasta llegar a 25  $^{\circ}\text{C}$  y se mantiene a esa temperatura a 25  $^{\circ}\text{C}$ . El total de duración del análisis fue de 20 minutos.

Para la interpretación de los amilogramas, se usaron los **parámetros siguientes**:

**Temperatura de la viscosidad máxima.** Es la temperatura (°C), calculada con base en el tiempo de funcionamiento del viscoamilógrafo, correspondiente al punto más alto de la curva del amilograma durante el ciclo de calentamiento;

**Viscosidad inicial (o viscosidad en frío).** Es el valor de la viscosidad en cP (Centipoise), en los primeros 5 minutos de calentamiento con el sistema de agitación de 160 rpm;

**Viscosidad máxima.** Es el valor de la viscosidad en el punto máximo de la curva, obtenido durante el ciclo de calentamiento, expresado en cP y calculado como máximo valor de temperatura a 95 °C.

**Viscosidad mínima de la pasta.** Menor valor después del pico de viscosidad.

**Viscosidad de quiebra o *Brakedown*.** Es a diferencia entre la viscosidad máxima y la viscosidad mínima;

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

**Tendencia a retrogradación o *Setback*.** Es la diferencia entre viscosidad final y el menor valor de viscosidad después del pico de viscosidad (Moura 2012).

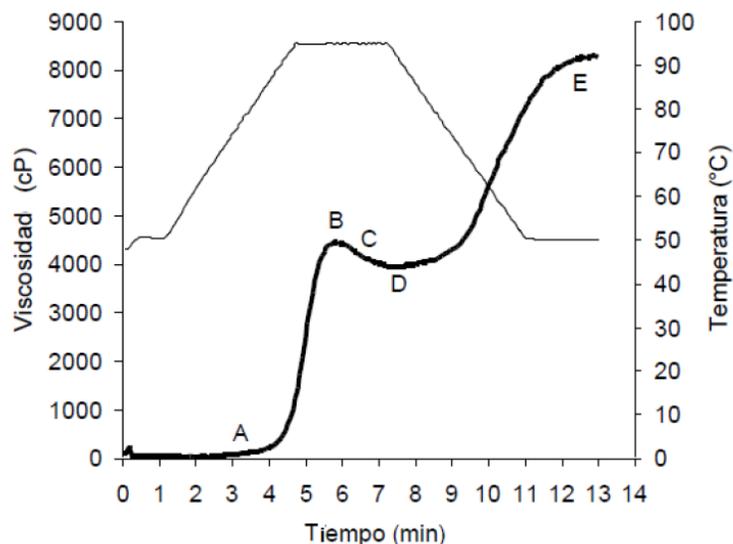


Figura 4. Amilograma obtenido con arroz al 12% de humedad (p/v) en el RVA modificado (Carvalho *et al.* 2011)

Donde el punto A se refiere a la viscosidad inicial de gelatinización y el punto B a la viscosidad máxima, con el almidón en su forma viscoelástica. Las letras C y D se refieren a la resistencia de los gránulos hinchados a la agitación mecánica, esto es la variación de la viscosidad de la pasta cuando ésta se agita continuamente con la temperatura constante de

95 °C. Las letras D y E representan el aumento de la viscosidad en el enfriamiento (Figura 4) a esto se le llama retrogradación, en esta etapa se da la reaproximación de las moléculas de amilosa y la pérdida de propiedades de absorción de agua, también se da la formación de un gel resistente (Carvalho *et al.* 2011).

### Comportamiento de las harinas extruídas.

**Microscopio electrónico de barrido.** La morfología de los tratamientos y de las harinas crudas se analizaron por medio de micrografías con microscopio electrónico de barrido (MEB) TM 3000 (Hitachi, Toquio, Japón) a 15 kV de aceleración y con 2000x de ampliación

**Análisis de color.** Se realizaron los análisis de: cada tratamiento, muestras de harinas antes de extruír y muestras de harinas mixtas comerciales obtenidas del mercado ecuatoriano.

Se llevó a cabo análisis por triplicado siguiendo la metodología dictada por Colorflex Huentelab, se utilizó  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , en donde  $L^*$  indica luminosidad,  $a^*$  muestra la intensidad del color rojo y  $b^*$  la intensidad del color amarillo (Figura 5). Los límites de los parámetros fueron:

- $L^*$ = Luminosidad, va desde 0=rojo y 100=blanco.
- $a^*$ = -80 hasta 0 =verde y de 0 a +100= rojo
- $b^*$ = -100 hasta 0= azul y de 0 a +70=amarillo

La diferencia total del color ( $\Delta E$ ) fu determinada usando:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad [11]$$

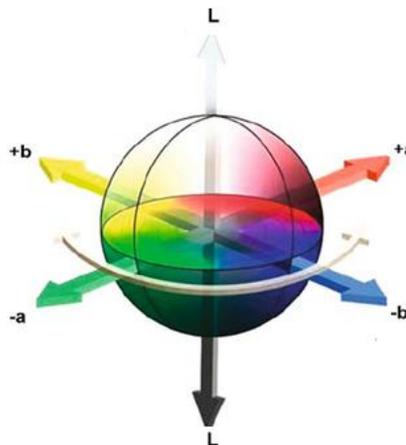


Figura 5. El cúbico CIE Lab en el espacio de color, adaptado (Shukla 2009).

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Para la producción de harinas es importante determinar varias características, las mismas que van a definir su comportamiento y sus posibles usos. Es por eso que se realizaron diferentes análisis detallados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Variables independientes y dependientes de los tratamientos evaluados en la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

		Variables independientes				Variables dependientes										
		Codificadas		Reales		IER	ISA	IAA	RVA							
		X1	X2	X1	X2		$\frac{g\ ss.}{100\ g\ muestra}$	$\frac{g\ gel}{g\ muestra}$	TP	Vini	Vmax. calent.	Vmin	BD	Vmax. enfria.	SB	Vfin
									°C	cP	cP	cP	cP	cP	cP	cP
TRT																
Puntos Factoriales	1	-1	-1	112	200	2.15	5.80	5.88	50.10	148.00	570.50	493.00	77.50	1122.50	629.50	1120.00
	2	-1	1	112	300	3.01	10.02	5.15	50.10	296.50	448.00	351.00	97.00	823.50	472.50	822.00
	3	1	-1	168	200	1.95	6.70	5.36	49.20	120.50	489.00	458.50	30.50	976.50	518.00	976.50
	4	1	1	168	300	2.30	8.22	4.95	60.50	166.00	439.50	414.50	25.00	893.50	479.00	877.00
Puntos Axiales	5	-1.414	0	100	250	2.62	5.89	6.97	52.15	178.50	510.50	436.00	74.50	965.00	529.00	964.50
	6	1.414	0	179	250	1.54	6.19	5.74	51.10	102.50	467.00	450.50	16.50	1000.50	550.00	999.50
	7	0	-1.414	140	180	2.10	5.95	6.01	45.45	148.50	540.00	496.50	43.50	1075.50	579.00	1072.50
	8	0	1.414	140	321	2.63	8.71	5.21	53.00	174.50	436.00	384.50	51.50	871.00	486.50	861.00
Puntos Centrales	9	0	0	140	250	2.44	7.99	5.58	44.70	170.00	472.50	417.00	55.50	948.50	531.50	934.00
	10	0	0	140	250	2.42	8.42	6.24	50.10	125.00	485.50	447.50	38.00	1021.00	573.50	999.50
	11	0	0	140	250	2.54	6.39	5.77	47.30	124.00	490.50	440.00	50.50	1009.00	569.00	984.50
	12	0	0	140	250	2.29	6.50	5.96	48.30	96.50	481.00	424.50	56.50	981.00	556.50	962.50

Donde: TRT: tratamiento, X2: Rotación del tornillo, X1: Temperatura, IER: Índice de Expansión Radial, ISA: Índice de solubilidad en agua, IAA: Índice de absorción en agua, TP: Temperatura inicial de pasta, Vini: Viscosidad máxima a frío, Vmax. calent.: Viscosidad máxima, Vmin: Viscosidad mínima de enfriamiento, BD: Temperatura de quiebra, Vmax. enfria.: Viscosidad máxima en enfriamiento, SB: Tendencia a retrogradación, Vfin: Viscosidad final

**Índice de expansión radial (IER).** El IER se puede correlacionar con variables singulares como: humedad, presión, velocidad del tornillo, entre otros; estos pueden ser cuantificados (Tang *et al.* 1994). Es por eso que el IER puede ser uno de los test más valiosos de la caracterización física para evaluar los productos extruidos y determinar si los resultados van acorde a los objetivos del producto final o si la materia prima no se ajusta a los requerimientos planteados (Launay *et al.* 1999).

La expansión se da después de una presión generada a la materia prima por la rotación del tornillo hacia la matriz del extrusor, esto produce que exista una evaporación de la humedad interna del material que resulta con la formación de burbujas de aire y forma la expansión (Bouzaza *et al.* 1996).

El IER varió de 1.54 para el tratamiento 6 hasta 3.01 para el tratamiento 2 (Cuadro 3). El IER mayor se dio a una temperatura de 112 °C y una rotación de 300 rpm. Las condiciones de humedad fueron constantes a 16%. El segundo resultado mayor expansión fue 2.63 para el tratamiento 8 con 140 °C de temperatura y 321 rpm de rotación del tornillo con humedad constante a 16%. Se puede observar (Figura 6) que existirá mayor IER si la rotación (rpm) aumenta mientras que la temperatura toma un valor cuadrático entre 120 y 140 °C (Ecuación 11).

Silva en 2010 obtuvo resultados similares con una expansión entre 1.34 a 6.87, en su trabajo estudió diferentes variables como la humedad, temperatura y rotación del tornillo; su tratamiento más expandido fue de 140 °C 160 rpm y 18% de humedad. También llegó a la conclusión de que a mayor rotación de tornillo mayor es el IER y que la temperatura ideal de sería entre 140 y 160 °C para obtener una mayor expansión.

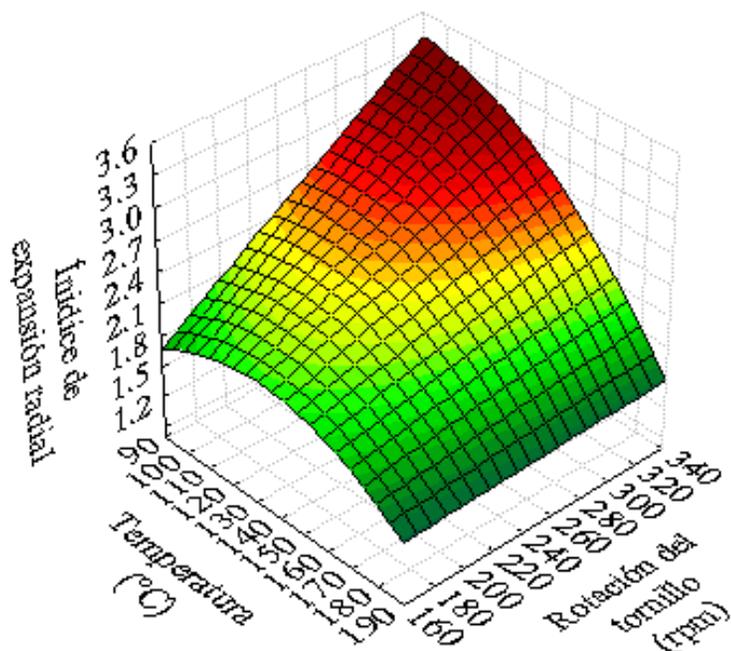


Figura 6. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Índice de expansión radial de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Cuadro 4. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Índice de expansión radial (IER) de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Índice de expansión radial	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	2.42E+00	2.2E-05 *
<b>x<sub>1</sub></b>	-3.05E-01	3.6E-03 *
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	-1.37E-01	4.4E-02 *
<b>x<sub>2</sub></b>	2.47E-01	6.7E-03 *
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	4.34E-03	9.2E-01 ♣
<b>x<sub>1</sub>×x<sub>2</sub></b>	-1.27E-01	9.1E-02 *
<b>Falta de ajuste</b>		1.7E-01
<b>F. Calculado &gt; F. Tabular</b>	17.653	>2.961

X<sub>1</sub>: temperatura (°C); X<sub>2</sub>: rotación (rpm)

♣: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10 .

Mediante el análisis de superficie de respuesta con el uso de los coeficientes observados y obtenidos se consiguió la ecuación de modelo matemático propuesto para las variables independientes con un  $R^2 = 0.91027$  queda de la siguiente manera (Ecuación 12):

$$\text{IER} = 2.422 - 0.305 X_1 - 0.137 X_1^2 + 0.247 X_2 - 0.127 X_1 \times X_2 \quad [12]$$

La ecuación matemática obtenida a partir del modelo de superficie de respuesta de esta investigación tiene un valor para el coeficiente de determinación de 0.91% de predictividad y con un 9% de error experimental. Esto hace que la ecuación obtenida sea de tipo predictiva. El Cuadro 4 muestra con más detalle los valores de la Ecuación 12 con sus respectivas probabilidades.

**Análisis de imagen.** Las muestras de los extruidos fueron evaluadas con el uso de imágenes de escaner, para determinar de manera visual la diferencia de tratamientos provocadas por las condiciones a las que fueron sometidos (Cuadro 2) siguiendo el diseño estadístico.

Se sabe que la posición estructural interna y la constitución química de las células que conforman el extruido le dan distintas características de textura (Teba 2014), esto permite que predecir la aceptación que tendrá por parte del consumidor ya que esto determinará en parte si el producto se lo podrá usar en ya sea en: sopas, coladas, papillas harinas para panificación o para pastelería, etc.

Cuando se produce la expansión en un extruidos pueden tener diferentes tamaños de burbujas de aire con una distribución uniforme. En caso de los que tienen burbujas de aire grandes y pequeños es decir no homogéneos sus paredes entre burbujas son más duras, en comparación de los extruidos que tienen espacios de burbujas de aire similares las paredes de éstas son más finas y fáciles de romper (Teba 2014). Como ya se revisó en el IER, a mayor expansión mayor solubilidad de la harina extruida y una mayor viscosidad inicial (Cuadro 3), que son características deseadas en éste estudio.

En este caso, los tratamientos más favorables se muestran para: 2, 5, 8 que fueron los que presentan una mayor expansión.

							
<b>Rotación (rpm)</b>	200	<b>Temperatura (°C)</b>	112	<b>Rotación (rpm)</b>	300	<b>Temperatura (°C)</b>	112
TRT 1	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	2.15	TRT 2	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	3.01
							
<b>Rotación (rpm)</b>	200	<b>Temperatura (°C)</b>	168	<b>Rotación (rpm)</b>	300	<b>Temperatura (°C)</b>	168
TRT 3	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	1.95	TRT 4	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	2.30
							
<b>Rotación (rpm)</b>	250	<b>Temperatura (°C)</b>	100	<b>Rotación (rpm)</b>	250	<b>Temperatura (°C)</b>	179
TRT 5	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	2.62	TRT 6	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	1.54

							
<b>Rotación (rpm)</b>	180	<b>Temperatura (°C)</b>	140	<b>Rotación (rpm)</b>	231	<b>Temperatura (°C)</b>	140
TRT 7	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	2.10	TRT 8	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	2.63
							
<b>Rotación (rpm)</b>	250	<b>Temperatura (°C)</b>	140	<b>Rotación (rpm)</b>	250	<b>Temperatura (°C)</b>	140
TRT 9	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	2.44	TRT 10	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	2.42
							
<b>Rotación (rpm)</b>	250	<b>Temperatura (°C)</b>	140	<b>Rotación (rpm)</b>	250	<b>Temperatura (°C)</b>	140
TRT 11	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	2.54	TRT 12	<b>H=16%</b>	<b>IER</b>	2.29

Figura 7. Corte transversal de los tratamientos expandidos de la harina mixta de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado procesados en diferentes condiciones de rotación de tornillo y temperatura de la tercera sección del extrusor monotornillo.

**Índice de solubilidad en agua (ISA).** El ISA se relaciona con la cantidad de sólidos solubles presentes en una muestra seca después de la evaporación del sobrenadante. Éste, muestra que tan severo fue el tratamiento aplicado en función de la degradación, dextrinización y gelatinización. También, de esta manera se puede medir el grado de solubilización de un almidón extruido en sopas, purés, coladas, bebidas, y otros (Carvalho 2002 y Silva 2007).

Este análisis es importante pues nos indica el grado de dextrinización de la muestra extruida y su comportamiento con el agua o al mezclarse con otros alimentos. Los mejores resultados para ISA fueron el del tratamiento 2 de 10.02% (Cuadro 3) con una temperatura de 112 °C en la tercera sección del extrusor, una rotación de 300 rpm y una humedad constante de 16%. Estos resultados dieron igual que en el IER esto muestra que pueden estar directamente relacionados. Moura en 2012 llegó a la misma conclusión de obtener resultados directamente proporcionales entre IER e ISA.

Cuadro 5. Coeficientes de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Índice de solubilidad en agua (ISA) de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Índice de solubilidad en agua	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	7.32E+00	7.67E-04 *
<b>x<sub>1</sub></b>	- 5.77E-02	8.85E-01 *
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	- 3.92E-01	4.09E-01 ⚬
<b>x<sub>2</sub></b>	1.20E+00	4.62E-02 *
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	2.52E-01	5.83E-01 *
<b>X<sub>1</sub>×X<sub>2</sub></b>	- 6.74E-01	2.84E-01 ⚬
<b>Falta de ajuste</b>		5.64E-01
<b>F. Calculado&gt;F. Tabular</b>		13.903 >3.285

X<sub>1</sub>: temperatura (°C); X<sub>2</sub>: rotación (rpm)

⚬: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10 .

Se consiguió la ecuación de modelo matemático propuesto para las variables independientes con un R<sup>2</sup> = 0.7007 queda de la siguiente manera (Ecuación 13):

$$ISA = 7.526 - 0.442 X_1^2 + 1.204 X_2 - 0.674 X_1 \times X_2 \quad [13]$$

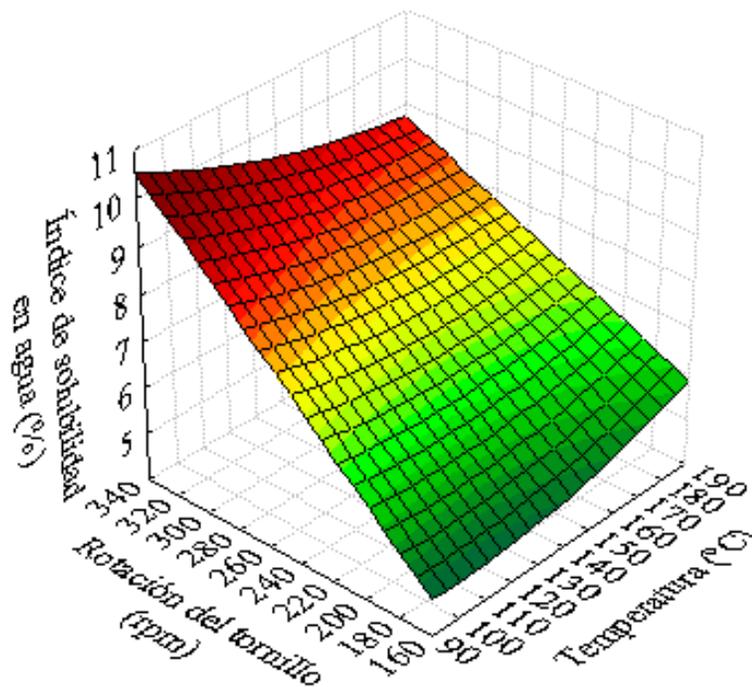


Figura 8. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Índice de solubilidad en agua de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

El Cuadro 5 presenta los valores obtenidos para ISA con el análisis de superficie de respuesta en una regresión con un coeficiente de determinación de 0.70% de predictividad y con un 30% de error experimental. La Ecuación 13 muestra detalladamente los valores usados con sus respectivas probabilidades y se puede observar gráficamente en la Figura 8.

**Índice de absorción en agua (IAA).** El IAA se relaciona con la capacidad de absorber y retener agua del material a extruirse. En el proceso de extrusión se gelatinizan los almidones y se desnaturalizan las proteínas, de esta manera el almidón pregelatinizado puede absorber más agua que si estuviese en su estado natural, lo mismo pasa con las proteínas; la explicación de esto es que las conformaciones estructurales fueron modificadas. Los balances hidrofílicos e hidrofóbicos están modificados y esto puede contribuir para un mayor o menor IAA (Teba 2014). También se puede medir el rendimiento de un producto con la ayuda de IAA ya que es la capacidad de absorber agua y por ende el aumento de peso (Silva 2007).

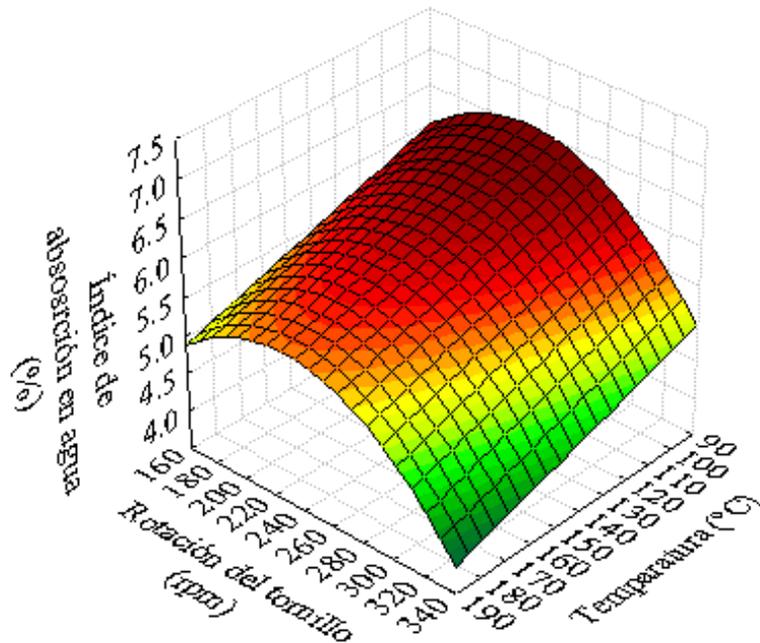


Figura 9. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Índice de absorción en agua de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Cuadro 6. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Índice de absorción en agua (IAA) de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coefficientes	Índice de absorción en agua	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	5.89E+00	2.97E-05 *
<b>x<sub>1</sub></b>	-3.09E-01	5.25E-02 *
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	7.37E-02	5.53E-01 .
<b>x<sub>2</sub></b>	-2.84E-01	6.41E-02 *
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	-2.99E-01	7.40E-02 *
<b>X<sub>1</sub>×X<sub>2</sub></b>	8.15E-02	6.01E-01 .
<b>Falta de ajuste</b>		1.37E-01
<b>F. Calculado &gt; F. Tabular</b>	4.157	> 2.924

X<sub>1</sub>: temperatura (°C); X<sub>2</sub>: rotación del tornillo (rpm)

.: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10

El Cuadro 6 presenta los valores obtenidos para IAA y la ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un  $R^2 = 0.6191$  se muestra en la Ecuación 14 de la siguiente manera:

$$IAA = 5.885 - 0.309 X_1 - 0.284 X_2 - 0.299 X_2^2 \quad [14]$$

En este caso el IAA más elevado fue el del tratamiento 5 con 6.97% (Cuadro 3) los parámetros del experimento fueron 179 °C para la temperatura, con una rotación de tornillo de 250 rpm a humedad constante 16%. Esto indica que el tratamiento 5 posiblemente sería el más rendidor. La Ecuación 14 puede mostrar mejor de una manera matemática y la Figura 9 el comportamiento de la harina mixta al hacer el análisis de IAA. El coeficiente de determinación de 0.62 de predictividad y con un 38% de error experimental lo que muestra que es un modelo predictivo.

**Viscosidad de pasta.** El grado de gelatinización del almidón y la tasa de fragmentación y solubilización molecular determinan la viscosidad del material extruido. La viscosidad es una propiedad indispensable en un material amiláceo. Se pueden determinar diferentes características de un extruido dependiendo de las modificaciones que sufrieron las estructuras moleculares del almidón, esto se da durante el calentamiento y en el enfriamiento hasta observar la retrogradación (Moura 2012).

Los resultados de la viscosidad inicial (25 °C), viscosidad máxima (95 °C), viscosidad mínima, viscosidad final, temperatura de quiebra y tendencia a retrogradación se presentan en la Cuadro 3.

**Viscosidad máxima a frío.** La viscosidad a 25 °C se considera viscosidad en frío, esta propiedad muestra qué tan bueno es un extruido para los alimentos instantáneos, muestra la capacidad de absorción de agua hasta forma un gel líquido o viscoso. Se obtendrá un producto más viscoso a mayor gelatinización (Carvalho *et al.* 2002).

Los valores obtenidos en esta etapa van desde 96.50 cP a 296.50 cP, se puede notar que existe una diferencia entre los tratamientos (Cuadro 3). La viscosidad más alta se encontró en el tratamiento 2 con un parámetro de trabajo de 112 °C Y 300 rpm con una humedad constante de 16% en la rotación del tornillo. Se puede notar que este tratamiento coincide con el de mayor valor con el índice de expansión radial y con el índice de solubilidad.

Moura (2012) indicó también que la humedad juega un papel indispensable para la viscosidad máxima en frío. En su estudio trabajó con arroz, maíz y frijol su tratamiento con mayor viscosidad a 25 °C fue el que tenía 180 °C, 120 rpm y 24% de humedad con un resultado de 990 cP.

El cuadro 7 presenta los valores obtenidos para viscosidad máxima a frío. La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un  $R^2 = 0.7343$  se muestra en la Ecuación 15 de la siguiente manera:

Viscosidad máxima a frío =

$$147.600 - 33.185 X_1 + 28.846 X_2 + 16.350 X_2^2 - 25.750 X_1 \times X_2 \quad [15]$$

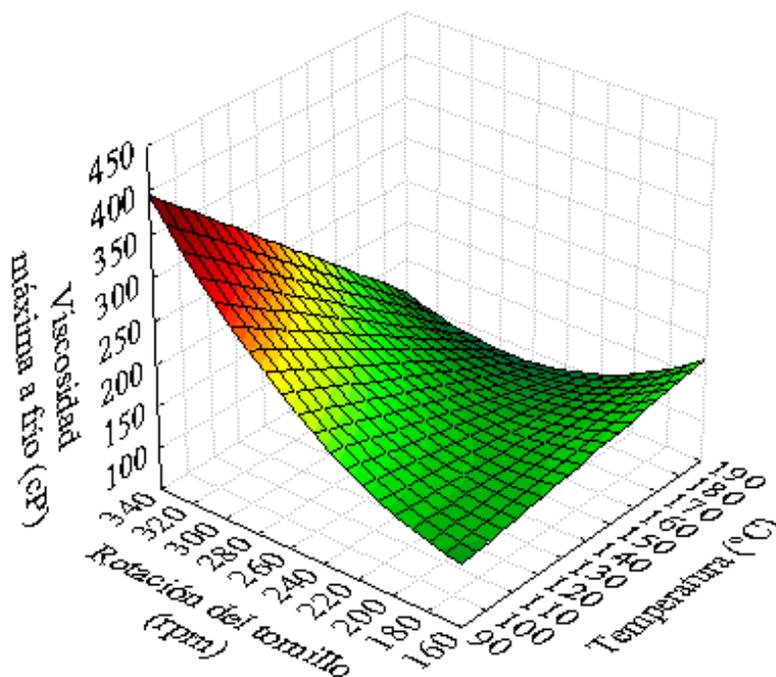


Figura 10. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre la Viscosidad máxima a frío de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Cuadro 7. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el Viscosidad máxima a frío de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coefficientes	Viscosidad máxima a frío	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	1.42E+02	9.89E-04 *
<b>x<sub>1</sub></b>	-3.32E+01	2.32E-02 *
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	7.31E+00	4.59E-01 .
<b>x<sub>2</sub></b>	2.88E+01	3.35E-02 *
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	1.78E+01	1.31E-01 .
<b>X<sub>1</sub>×X<sub>2</sub></b>	-2.58E+01	9.97E-02 *
<b>Falta de ajuste</b>		1.52E-01
<b>F. Calculado&gt;F. Tabular</b>		5.234>2.924

X<sub>1</sub>: temperatura (°C); X<sub>2</sub>: rotación del tornillo;

.: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10

Se logró obtener un coeficiente de determinación de 0.73% de predictividad y con un 27% de error experimental con la ayuda del modelo de superficie de respuesta, que mostró que el modelo es predictivo. La ecuación 15 muestra matemáticamente las relaciones lineares y cuadráticas de la temperatura y rotación del tornillo y la Figura 10 lo muestra de manera gráfica.

**Viscosidad máxima.** La viscosidad máxima se da a una temperatura de 95 °C esto en el ciclo de calentamiento, este parámetro indica que tan elevada o baja puede ser la viscosidad de una muestra, esto también depende de la estructura granular de un almidón, de la cantidad de amilopectina y amilosa, de la distribución de las mismas y también de las combinaciones que pudiesen haberse formado con otros ingredientes. De esta manera se puede determinar si la harina extruída obtenida se la puede usar en galletería, sopas o papillas dependiendo de sus características. Este parámetro es importante cuando, por ejemplo, la harina destinada a sopas, coladas u otros donde se necesita conservar una viscosidad alta sobre la temperatura ambiente. La viscosidad máxima en el ciclo de calentamiento a 95 °C se da cuando los gránulos de almidón se gelatinizan e inmovilizan (Torres *et al.* 2005).

La viscosidad máxima a 95 °C produce una desorganización molecular a causa del calentamiento al que es sometida la muestra, esto da como resultado la hinchazón total y la gelatinización y absorción máxima de agua por los gránulos de almidón. Por lo general, cuando los valores de Viscosidad máxima son altos se muestra que los tratamientos aplicados a las harinas crudas no fueron suficientes para despolimerizar a las estructuras amiláceas lo que favorece a la dextrinización del material. De esta manera algunos gránulos de almidón llegan intactos y se gelatinizan en la fase de calentamiento (Silva 2010).

Los valores máximos y mínimos se dieron para el tratamiento 4 con 439,50 cP y el tratamiento 1 con 570,50 cP. En este caso el tratamiento 4 el más favorable, las condiciones de trabajo fueron 168 °C y 300 rpm para el tornillo con una humedad constante de 16%. Moura en el 2012 con su estudio de arroz, frijol y maíz obtuvo una viscosidad muy alta de 7260,50 cP con un tratamiento de 140 °C, 160 rpm y 24% de humedad ella concluyó que la cantidad de humedad en los tratamientos es indispensable para obtener mayor viscosidad, a mayor humedad mayor viscosidad en caliente (95 °C).

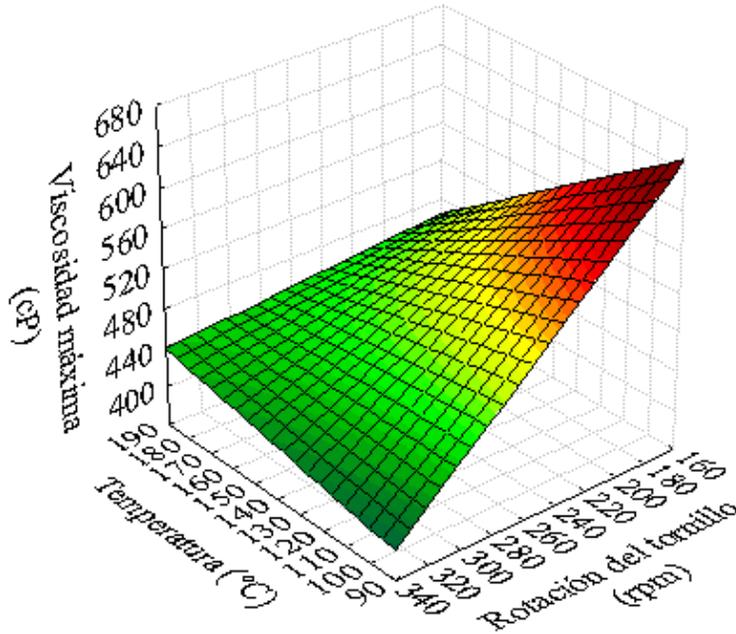


Figura 11. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Viscosidad máxima de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Cuadro 8. Coeficientes de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la Viscosidad máxima de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor ( $^{\circ}\text{C}$ ) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Viscosidad máxima	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	4.82E+02	1.10E-06 *
<b>x<sub>1</sub></b>	-1.89E+01	5.96E-03 *
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	2.78E+00	4.25E-01 <b>⚬</b>
<b>x<sub>2</sub></b>	-3.99E+01	6.74E-04 *
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	2.41E+00	4.84E-01 <b>⚬</b>
<b>X<sub>1</sub>×X<sub>2</sub></b>	1.83E+01	1.74E-02 *
<b>Falta de ajuste</b>		4.84E-01
<b>F. Calculado &gt; F. Tabular</b>	101.200	>2.924

X<sub>1</sub>: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ); X<sub>2</sub>: rotación del tornillo;  
**⚬**: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10

La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un  $R^2 = 0.9751$  se muestra en la Ecuación 16 de la siguiente manera:

$$\text{Viscosidad máxima} = 458.833 - 18.940 X_1 - 39.885 X_2 + 18.25 X_1 \times X_2 \quad [16]$$

Los resultados expresados por el método de superficie de respuesta (Cuadro 8) muestran un grado de predictividad muy alto de 0.97% con un error experimental de 0.03%, esto lleva a la conclusión de que se tiene un modelo predictivo para este parámetro. La Ecuación 16 indica matemáticamente los coeficientes significativos para este parámetro y la Figura 11 lo muestra de manera gráfica.

**Viscosidad mínima.** La viscosidad mínima a 95 °C temperatura constante se puede interpretar como el grado de desintegración de los gránulos de almidón y de otros componentes de la harina, esto corresponde al menor valor de viscosidad después del pico de gelatinización, en las harinas extruidas a una temperatura menor (Moura 2010). Los altos valores de humedad disminuyen la cantidad de gránulos degradados, es decir a menor humedad mayor intensidad de este parámetro (Teba 2014).

El tratamiento 2 tuvo la viscosidad menor, los parámetros usados fueron: 112 °C de temperatura, 300 rpm en la rotación del tornillo y una humedad constante de 16% se logró obtener 351.0 cP. Moura en el 2012 obtuvo con una mezcla de harinas (maíz, frijól y arroz) en el que su viscosidad mínima se a una temperatura de 126 °C con 140 rpm, esto muestra que existe similitud en resultados. En cambio, el tratamiento 7 tuvo la viscosidad mayor de 496.5 cP, con 140 °C, 180 rpm y 16% de humedad (Cuadro 3).

Cuadro 9. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la Viscosidad mínima en el enfriamiento de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Viscosidad mínima en el enfriamiento	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	4.32E+02	9.29E-06 *
<b>x<sub>1</sub></b>	6.19E+00	2.99E-01 ●
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	2.34E+00	7.00E-01 ●
<b>x<sub>2</sub></b>	-4.30E+01	3.18E-03 *
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	9.69E-01	8.72E-01 ●
<b>X<sub>1</sub>×X<sub>2</sub></b>	2.45E+01	3.92E-02 *
<b>Falta de ajuste</b>		6.02E-01
<b>F. Calculado&gt;F. Tabular</b>		57.358 >3.006

X<sub>1</sub>: temperatura (°C); X<sub>2</sub>: rotación del tornillo;

●: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10

La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un  $R^2 = 0.9273$  se muestra en la Ecuación 17 de la siguiente manera:

$$\text{Viscosidad mínima en el enfriamiento} = 434.458 - 43.049 X_2 + 24.500 X_1 \times X_2 \quad [17]$$

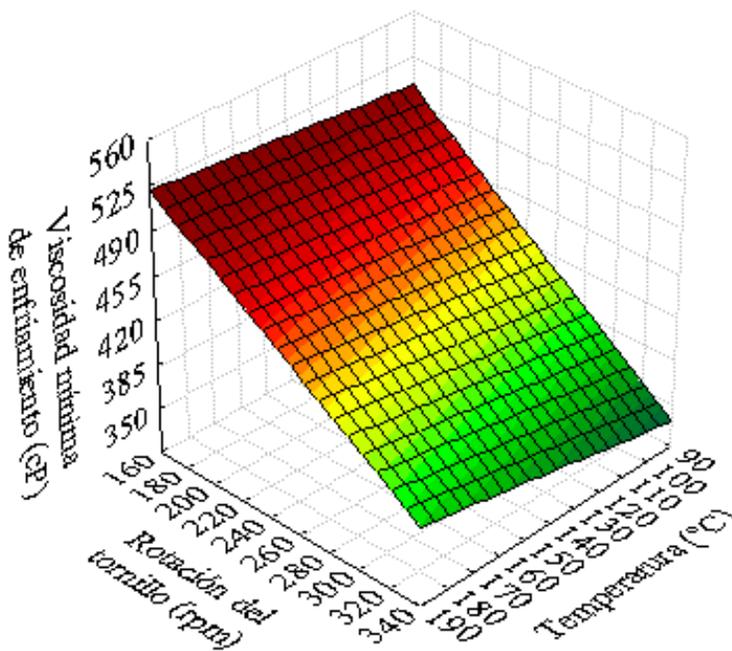


Figura 12. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre el Viscosidad mínima en el enfriamiento de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Se pueden observar de manera gráfica los datos obtenidos en el experimento (Figura 12) por el método de superficie. Numéricamente (Cuadro 9) dio como resultado una ecuación predictiva un ajuste de 0.92% y un error experimental de 0.08, la Ecuación 17 indica matemáticamente los factores que influyen en este parámetro.

**Temperatura de quiebra o Breakdown.** Temperatura de quiebra, se refiere a la diferencia entre el pico de viscosidad máxima menos la viscosidad mínima. La agitación mecánica permite visualizar la estabilidad del almidón en temperaturas elevadas (Lustsa *et al.* 2009).

En éste estudio los resultados obtenidos en la experimentación muestran al tratamiento 6 con 16.5 cP el menor valor de todos los tratamientos y 97.0 cP el tratamiento 2, de la siguiente manera: 179 °C y 250 rpm para el tornillo y 112 °C y 300 rpm respectivamente con una humedad constante de 16%. La temperatura de quiebra de harinas mixtas pregelatinizadas de arroz, frijól y arroz se dieron con 140 °C Y 160 rpm y 18% de humedad

Esto para un valor de viscosidad de 23,5 Cp, la autora acredita que estos valores se obtuvieron por una mayor degradación de la molécula de almidón (Moura 2012).

Cuadro 10. Coeficientes de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la Temperatura de quiebra de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

<b>Coeficientes</b>	<b>Temperatura de quiebra</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>Intercepto</b>	4.60E+01	1.04E-03 *
<b>x<sub>1</sub></b>	-2.51E+01	2.23E-03 *
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	2.50E+00	4.46E-01 <b>⦿</b>
<b>x<sub>2</sub></b>	3.16E+00	3.03E-01 <b>⦿</b>
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	3.50E+00	3.08E-01 <b>⦿</b>
<b>X<sub>1</sub>×X<sub>2</sub></b>	-6.25E+00	1.82E-01 <b>⦿</b>
<b>Falta de ajuste</b>		2.23E-01
<b>F. Calculado&gt;F. Tabular</b>	54.606	>3.285

X1: temperatura (°C); X2: rotación del tornillo;

⦿: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10

La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un  $R^2 = 0.8741$  se muestra en la Ecuación 18 de la siguiente manera:

$$Breakdown = 50.000 - 25.128 X_1 - 6.250 X_1 \times X_2 \quad [18]$$

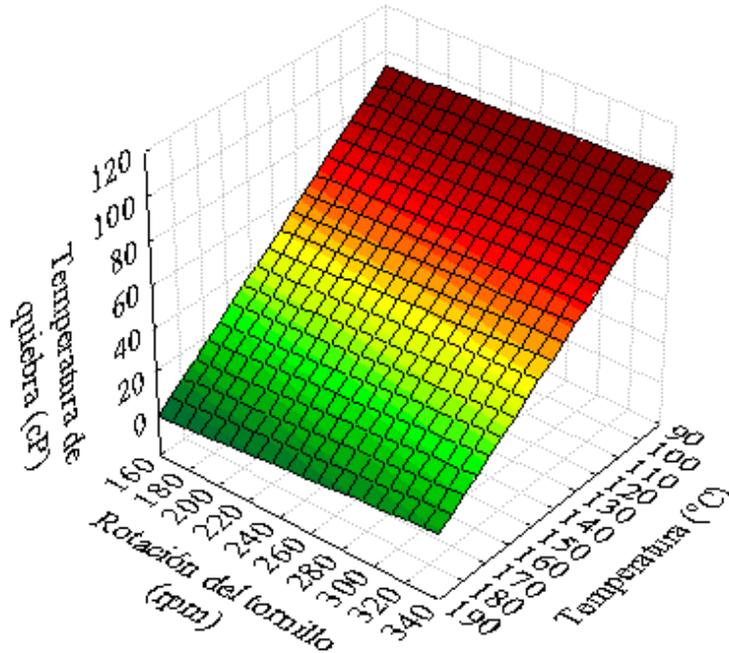


Figura 13. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre la Temperatura de quiebra de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Los resultados para éste parámetro se muestran en el Cuadro 10. Se puede observar también una ecuación matemática con un grado de predictividad de 87% obteniéndose un modelo predictivo y un error experimental de 23%.

**Tendencia a retrogradación.** La tendencia a retrogradación también es llamada *Setback* mide la diferencia entre la viscosidad final y el menor valor de viscosidad después del pico de viscosidad. Ésta evalúa cómo se comporta el almidón en la fase de enfriamiento (Teba 2014).

Al realizar una media estadística entre los resultados la tendencia de retrogradación de los tratamientos es de 557.62 cP de viscosidad, que es un valor mayor a la media obtenida en la viscosidad máxima de calentamiento a 95 °C que es de 482.38 cP. Con estos resultados se puede resaltar que las harinas producidas en este estudio tienen una buena tendencia a retrogradación. El mejor tratamiento 2 con 472.50 cP de viscosidad.

Cuadro 11. Coeficientes de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la Tendencia a retrogradación de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Tendencia a retrogradación	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	5.58E+02	1.06E-05 *
<b>x<sub>1</sub></b>	-9.41E+00	2.53E-01 .
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	-1.19E+01	2.08E-01 .
<b>x<sub>2</sub></b>	-4.09E+01	8.72E-03 *
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	-1.53E+01	1.33E-01 .
<b>X<sub>1</sub>×X<sub>2</sub></b>	2.95E+01	5.20E-02 *
<b>Falta de ajuste</b>		2.05E-01
<b>F. Calculado &gt; F. Tabular</b>		10.471 > 3.006

X<sub>1</sub>: temperatura (°C); X<sub>2</sub>: rotación del tornillo;

.: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10

La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un R<sup>2</sup> = 0.7108 se muestra en la Ecuación 19 de la siguiente manera:

$$\text{Tendencia a retrogradación} = 539.500 - 40.852 X_2 + 29.500 X_1 \times X_2 \quad [19]$$

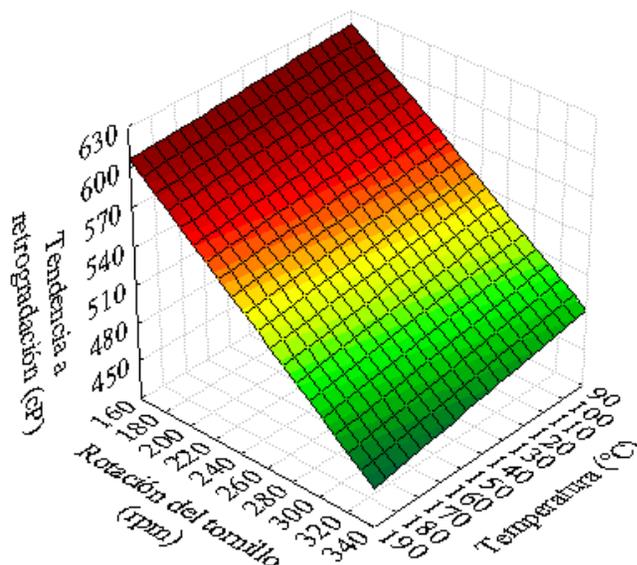


Figura 14. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo, sobre el Tendencia a retrogradación de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Con un ajuste de 71% en los resultados obtenidos (Cuadro 10) dio un modelo predictivo y un error experimental de 29%, esto se puede observar de manera gráfica en la Figura 14. La ecuación matemática (Ecuación 19) obtenida con los coeficientes significativos muestra la interacción de la temperatura con la rotación del tornillo.

**Viscosidad final.** La viscosidad final se evalúa en el ciclo de enfriamiento se relaciona con la recristalización de las moléculas de amilosa y amilopectina dadas en la retrogradación del almidón. Éstos cristales se dan por el agrupamiento de partes lineares de moléculas de almidón, principalmente de amilosa por la formación de puentes de hidrógeno (Carvalho *et al.* 2002), resultando de esa manera un precipitado microcristalinos y/o geles (Moura 2012), éstos dependen de la concentración de las soluciones y la velocidad de enfriamiento. Las soluciones de concentración alta que se enfrían con rapidez tienden a formar geles, y las soluciones más diluídas se precipitan debido a la formación de fracción de amilosa, con la amilopectina es más complicado por las ramificaciones que posee ésta molécula (Silva 2007). El tratamiento 1 obtuvo mejores resultados para viscosidad final con 1120.20 Cp.

Cuadro 12. Coeficientes de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la Viscosidad final de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Viscosidad final	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	9.70E+02	6.97E-06 *
<b>x<sub>1</sub></b>	-4.88E+00	6.61E-01 ●
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	-4.38E-01	9.71E-01 ●
<b>x<sub>2</sub></b>	-8.71E+01	3.25E-03 *
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	-8.06E+00	5.26E-01 ●
<b>X<sub>1</sub>×X<sub>2</sub></b>	4.96E+01	3.99E-02 *
<b>Falta de ajuste</b>		2.90E-01
<b>F. Calculado&gt;F. Tabular</b>		40.005 >3.006

X<sub>1</sub>: temperatura (°C); X<sub>2</sub>: rotación del tornillo;

●: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10

La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un R<sup>2</sup> = 0.8088 se muestra en la Ecuación 20 de la siguiente manera:

$$\text{Viscosidad final} = 964.458 - 87.076 X_2 + 49.625 X_1 \times X_2 \quad [20]$$

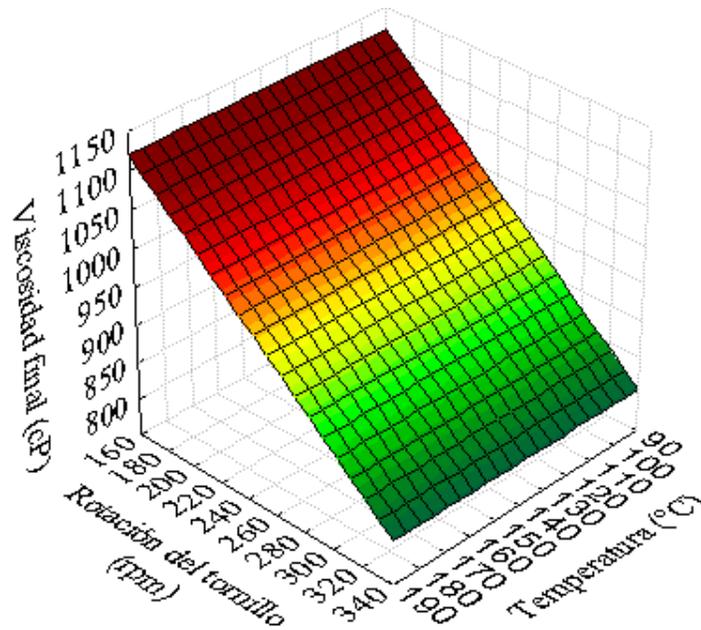


Figura 15. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo, sobre el Viscosidad final de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

La ecuación matemática fue obtenida (Ecuación 20) con los coeficientes significativos. El ajuste se dio en un 80% y un error experimental de 20%, obteniéndose un modelo predictivo para la viscosidad final (Cuadro 11).

**Análisis con microscopio electrónico de barrido.** Las microscopías electrónicas de barrido (MEB) fueron realizadas con diferentes tratamientos (Tratamiento 2, 3, 5, 6 y 7), ésto se realizó con el fin de verificar las posibles alteraciones en la superficie de las partículas. También se realizó el mismo análisis con harina de maíz cruda, harina mixta cruda (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) para poder observar si existe alguna diferencia con los tratamientos.

Se puede ver que existe algunas diferencias entre los gránulos crudos y los tratamientos extruidos, esto se atribuye a que fueron sometidos a diferentes presiones por la rotación del tornillo en la extrusión y también a la temperatura al pasar por la tercera sección del extrusor.

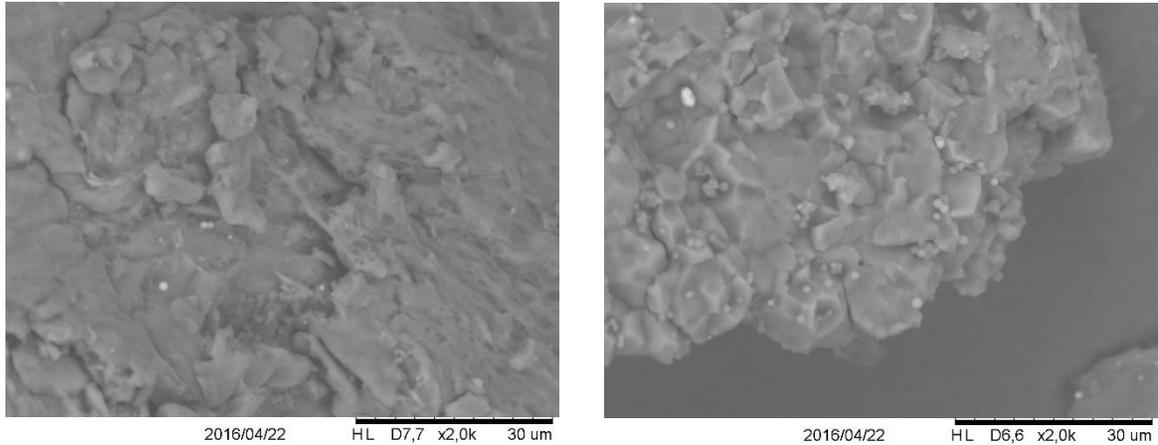


Figura 16. Microfotografías usando el microscopio electrónico de barrido (ampliación 2000x) de harina mixta cruda (derecha) y tratamiento 2 (izquierda).

Se seleccionó el tratamiento dos de referencia para mostrar la diferencia física del almidón ya que fue uno de los mejores resultados con los demás parámetros independientes. Las imágenes completas se encuentran en Anexo 16.

**Análisis de color de las harinas pregelatinizadas, materias primas y harinas similares en el mercado de Ecuador.** El color es una característica de la medida de luz en términos de intensidad y comportamiento de onda. La formación de color en el proceso de extrusión da una idea de la intensidad a la que fue sometida la materia prima y también depende de la formulación.

Si los tratamientos fueron sometidos de manera severa generalmente la Luminosidad es de valor bajo y los valores de  $a^*$ ,  $b^*$  y  $\Delta E$  aumentan de valor (Taba 2009). La estabilidad de color puede ser una característica de calidad para productos extruidos, en este caso obtener una harina que pueda tomar el color del alimento con el que vaya a ser consumido.

Cuadro 13. Resultados de la caracterización física del color de las materias prima, harinas pregelatinizadas, granos enteros de la materia prima y harinas similares en el mercado del Ecuador

Tratamiento	X1	X2	L*	a*	b*	ΔE
T1	112	200	80.13	1.11	19.06	7.97923
T2	112	300	80.98	0.86	18.59	6.73169
T3	168	200	80.31	1.33	18.25	7.24194
T4	168	300	81.70	0.93	17.20	5.72491
T5	100	250	80.92	0.96	18.73	6.85754
T6	179	250	82.06	0.84	16.92	5.15055
T7	140	180	82.06	0.84	16.92	6.60601
T8	140	321	81.00	0.96	18.30	6.36167
T9	140	250	81.70	0.83	17.89	6.09258
T10	140	250	80.86	0.79	18.86	7.13943
T11	140	250	80.89	0.97	18.63	6.98115
T12	140	250	81.42	1.07	18.16	6.83003
Tmix crudo	---	---	86.16	0.11	13.39	---
Harroz crudo	---	---	85.99	-0.04	11.97	---
Hmaíz extruido	---	---	81.45	3.08	32.50	---
grano Quínoa	---	---	72.29	3.86	23.31	---
grano Frijol	---	---	63.69	5.35	21.79	---
grano Arroz	---	---	63.88	2.65	25.26	---
Quinoasure	---	---	77.81	2.36	22.88	---
Fortaliz 1	---	---	85.08	0.98	12.22	---
Fortaliz 2	---	---	84.83	0.63	13.74	---

X<sub>1</sub>= Temperatura (°C.), X<sub>2</sub>= Rotación del tornillo (rpm), Tmix crudo= Tratamiento de granos mixtos (quínoa 20%, frijol caupí 15% y arroz parbolizado 65%), Harroz crudo= harina de arroz crudo, Hmaíz extruido= Harina de maíz cruda,

Harinas similares a la obtenida presente en el mercado en Ecuador: Quinoasure =Harina instantánea de quínoa, Fortaliz 1=Harina de quínoa, trigo y avena, Fortaliz 2= Harina de quínoa, trigo y leche en polvo

**Luminosidad.** La luminosidad da la claridad de color donde 0 es negro totalmente y 100 es blanco completamente (Teba 2009). En los resultados para luminosidad (cuadro 13) se observa que los valores están desde 80.13 hasta 82.6 para los tratamientos comparados a la harina mixta cruda (quínoa 20%, frijol caupí 15% y arroz parbolizado 65%) con un 86.16. Esto muestra que los tratamientos no fueron sometidos muy bruscamente. A comparación de Moura en el 2012 que también trabajó con harinas mixtas de frijol caupí, maíz y arroz que obtuvo resultados entre 79.04 a 80,84 donde muestra que su rango de variación de Luminosidad es más amplio, pero se asemeja mucho a los resultados de este estudio, solo que al extruirse su luminosidad decreció levemente, es decir que con el proceso de extrusión son las harinas se vuelven más oscuras. Sí existe variación de color del material durante el proceso de extrusión son evidentes los cambios químicos y nutricionales que se dieron, la intensidad de cambio muestra la severidad del proceso (Nascimento 2010).

Al comparar los resultados con las harinas comerciales la más lejana es Fortaliz 1 con 85.08 (Cuadro 13) y Quinoasure con 77.81, éstos valores muestran que cualquier tratamiento es similar a los resultados obtenidos en este estudio.

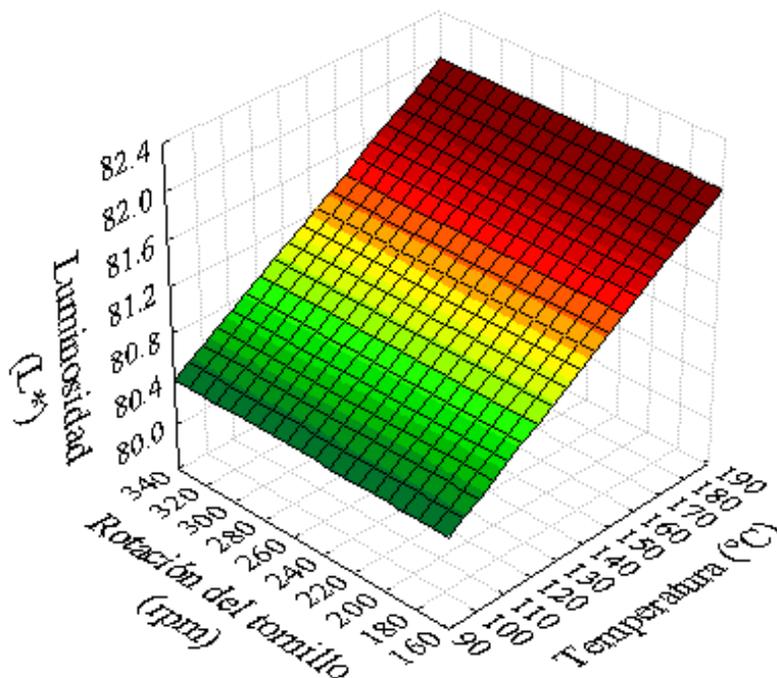


Figura 17. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo, sobre la Luminosidad en color de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Cuadro 14. Coeficiente de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la Luminosidad en CIE Lab de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor ( $^{\circ}\text{C}$ ) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Luminosidad	Probabilidad
Intercepto	8.13E+01	1.21E-08 *
$x_1$	4.45E-01	2.19E-02 $\bullet$
$x_1^2$	2.37E-02	8.47E-01 $\bullet$
$x_2$	2.29E-01	1.09E-01 *
$x_2^2$	-1.26E-01	3.46E-01 $\bullet$
$X_1 \times X_2$	5.00E-03	9.74E-01 *
Falta de ajuste		8.34E-02
<b>F. Calculado &gt; F. Tabular</b>		7.082 > 2.961

$X_1$ : temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $X_2$ : Rotación del tornillo (rpm);  
 $\bullet$ : No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10.

La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un  $R^2 = 0.5431$  se muestra en la Ecuación 21 de la siguiente manera:

$$\text{Luminosidad} = 81.260 + 0.229 X_2 + 0.005 X_1 \times X_2 \quad [21]$$

Se puede notar que los coeficientes significativos (cuadro 14) fueron para temperatura lineal y cuadrática con la rotación cuadrática, lo que dio como resultado una ecuación sencilla con un coeficiente de predictividad de 54% y un error experimental de 46%. El error alto se puede deber a una descalibración del equipo Hunter Lab.

**Cromaticidad  $a^*$ .** Los colores rojos (positivos) y verdes (negativos) son medidos por la cromaticidad  $a^*$  (Teba 2014). El valor para las harinas crudas (Cuadro 13) fue de 0.11, las harinas de los tratamientos extruidos dieron en un rango de 0.79 a 1.33. Esto nos muestra que para este parámetro la extrusión fue un factor determinante que aumentó la cromaticidad  $a^*$ . También, la temperatura y la velocidad de rotación (rpm) se muestran relacionadas (Figura 18) lo cual indica que una variable independiente se modificó al cambiar la otra (León y Montero 2000). El aumento en la velocidad del tornillo en el proceso de extrusión reduce los valores de  $a^*$  por el tiempo de permanencia de la materia dentro del cañón del extrusor, es decir directamente proporcional con el tiempo de residencia dentro del extrusor. Si el material permanece mucho tiempo dentro del extrusor experimenta un oscurecimiento no enzimático por las condiciones a las que es sometido y por la presencia de azúcares reductores y péptidos (Bhattacharya *et al.* 1997).

Teba en el 2014 realizó un análisis de color de su harina mixta (arroz, maíz y frijol caupí) y concluyó que los resultados deseables para su experimento fueron entre los valores de: 5.16 y 3.33. Éstos pueden ser diferentes a los de este estudio por la materia prima que está usando y los porcentajes de cada una. A diferencia de las marcas comerciales que tiene unos valores entre 0.63 y 2.36, por ejemplo, la primera es una harina que se compone solo de quínoa y la segunda es una harina mezclada con quínoa, leche en polvo y trigo posiblemente esas sean las razones de las diferencias. Finalmente, cualquiera de los tratamientos está muy cerca de las harinas que están en el mercado ecuatoriano y comparten el mismo objetivo de uso comercial al igual harinas de este estudio.

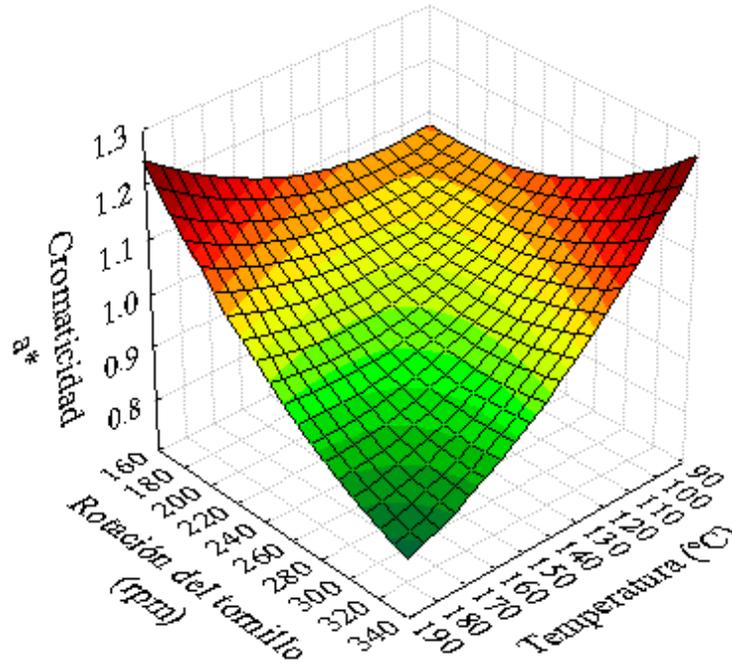


Figura 18. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre la Cromaticidad  $a^*$  de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Cuadro 15. Coeficientes de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la cromaticidad  $a^*$  en CIE Lab de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor ( $^{\circ}\text{C}$ ) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Cromaticidad $a^*$	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	8.43E-01	1.47E-04 *
<b>X1</b>	-5.09E-02	1.26E-01 $\bullet$
<b>X1<sup>2</sup></b>	1.56E-01	1.05E-02 $\bullet$
<b>X2</b>	-3.58E-02	2.36E-01 *
<b>X2<sup>2</sup></b>	7.56E-02	6.82E-02 $\bullet$
<b>X1×X2</b>	7.75E-02	1.09E-01 *
<b>Falta de ajuste</b>		5.49E-02
<b>F. Calculado &gt; F. Tabular</b>		5.439 > 3.108

X<sub>1</sub>: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ); X<sub>2</sub>: Rotación del tornillo (rpm);  
 $\bullet$ : No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10.

La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un  $R^2 = 0.62204$  se muestra en la Ecuación 22 de la siguiente manera:

$$\text{Cromaticidad } a^* = 0.843 - 0.036 X_2 + 0.078 X_1 \times X_2 \quad [22]$$

La figura 18 muestra que existe una mayor cromaticidad  $a^*$  es decir una leve tendencia hacia el color rojo al disminuir la temperatura y la rotación del tornillo, teniendo en cuenta que la humedad es constante de 16%. Finalmente, la mejor opción es la de menor temperatura ya que la energía térmica es más económica que la energía mecánica.

Se observa (Cuadro 15) que los coeficientes significativos van desde una rotación del tornillo en forma lineal y una mezcla de los dos parámetros para formar la ecuación  $a^*$  mediante el uso de una regresión cuadrática de superficie de respuesta. El coeficiente de predictividad fue de 62% con un error experimental de 38% que da como resultado una ecuación predictiva. El error experimental alto se debió quizá a una descalibración del equipo Hunter Lab.

**Cromaticidad  $b^*$ .** Se puede medir la intensidad de amarillo o azul si el valor de cromaticidad  $b^*$  es mayor o menor respectivamente (Teba 2014). Los valores obtenidos en este experimento dieron en un rango de 16.92 a 19.06, como los valores son positivos se puede deducir que hay una tendencia a amarillo y la harina cruda mixta (quínoa 20%, frijol caupí 15% y arroz parbolizado 65%) dio un valor de 13.39 (Cuadro 13). Es lógico que los valores de las harinas extruidas aumentasen ya que fueron sometidas a presión y calor. Moura en el 2012 trabajó con una mezcla de arroz, frijol caupí y maíz dio un valor entre 20.52 a 19, 32, lo que muestra que el proceso de extrusión provoca una intensidad en ese parámetro.

Como se puede comparar con las harinas comerciales que tiene un rango entre 13.74 para Fortaliz 2 y 22.88 para Quinoasure (Cuadro 13), estas diferencias se deben a que la primera es una harina cruda y que la segunda es una harina instantánea lo que muestra que pasó por algún proceso físico.

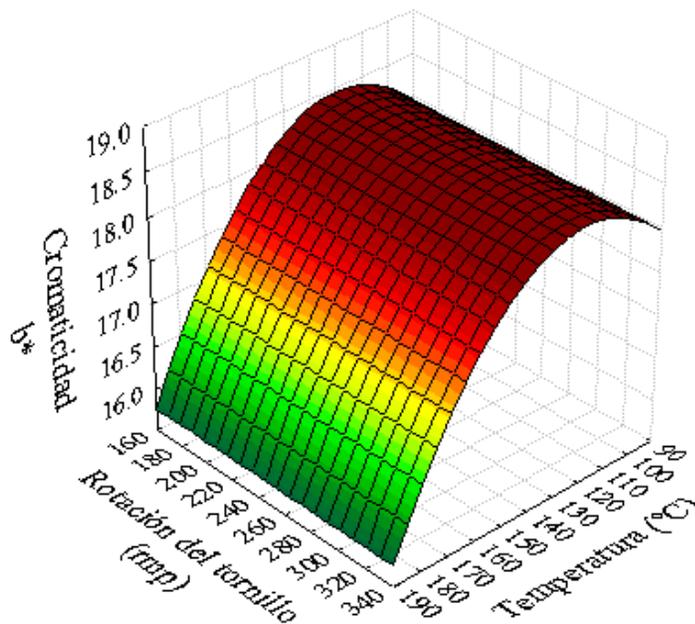


Figura 19 Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre la cromaticidad b\* de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Cuadro 16. Coeficientes de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la cromaticidad b\* en CIE Lab de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Cromaticidad b*	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	1.83E+01	2.30E-06 *
<b>x1</b>	-6.17E-01	1.83E-02 .
<b>x1<sup>2</sup></b>	-4.59E-01	5.23E-02 .
<b>x2</b>	-5.95E-02	6.82E-01 *
<b>x2<sup>2</sup></b>	-1.37E-01	4.21E-01 .
<b>X1×X2</b>	1.65E-01	4.40E-01 *
<b>Falta de ajuste</b>		0.870719
<b>F. Calculado&gt;F. Tabular</b>		25.743 >3.006

X1: temperatura (°C); X2: Rotación del tornillo (rpm);  
 .: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10

La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un  $R^2 = 0.89895$  se muestra en la Ecuación 23 de la siguiente manera:

$$\text{Cromaticidad } b^* = 18.345 - 0.060 X_2 + 0.165 X_1 \times X_2 \quad [23]$$

Los coeficientes significativos (Cuadro 16) en éste parámetro se dieron para rotación del tornillo lineal y para la interacción de temperatura y la rotación de tornillo. El coeficiente de predictividad de 89% con un bajo error experimental de 11%. De esta manera la ecuación planteada con la ayuda del diseño experimental de superficie de respuesta se tiene una ecuación matemática predictiva.

**Diferencia de color ( $\Delta E$ ).** La determinación de color es muy importante para poder relacionarla con su uso (Rocha 2009). En este caso es fundamental ya que se trata de una harina mixta parcialmente soluble que tiene el potencial mezclarse con otros alimentos como complemento.

La diferencia de color en los tratamientos varió desde 5.46 a 8.34 (Cuadro13) para el tratamiento 6 (179°C, 250 rpm) y 7 (140°C, 180 rpm) con el mismo valor mínimo y el tratamiento 1 (112°C, 200rpm) con el valor mayor.

Cuadro 17. Coeficientes de regresión y su probabilidad de un modelo de regresión cuadrático aplicado en Diferencia de color en CIE Lab de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado) en función de la variación de la temperatura de la tercera zona del extrusor (°C) y de la rotación del tornillo (rpm).

Coeficientes	Diferencia de color	Probabilidad
<b>Intercepto</b>	6.76E+00	8.82E-05 *
<b>x<sub>1</sub></b>	-5.20E-01	5.03E-02 ●
<b>x<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	-2.10E-01	3.35E-01 ●
<b>x<sub>2</sub></b>	-3.89E-01	9.81E-02 *
<b>x<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	3.04E-02	8.79E-01 ●
<b>X<sub>1</sub>×X<sub>2</sub></b>	-6.74E-02	7.90E-01 *
<b>Falta de ajuste</b>		2.23E-01
<b>F. Calculado&gt;F. Tabular</b>		5.727 >3.006

X<sub>1</sub>: temperatura (°C); X<sub>2</sub>: Rotación del tornillo (rpm);  
 ●: No significativo; \*: significativo a una probabilidad < 0.10.

La ecuación del modelo matemático propuesto para las variables independientes mediante el modelo de superficie de respuesta con un R<sup>2</sup> = 0.61251 se muestra en la Ecuación 24 de la siguiente manera:

$$\text{Diferencia de color} = 6.761 - 0.389 X_2 - 0.067 X_1 \times X_2 \quad [24]$$

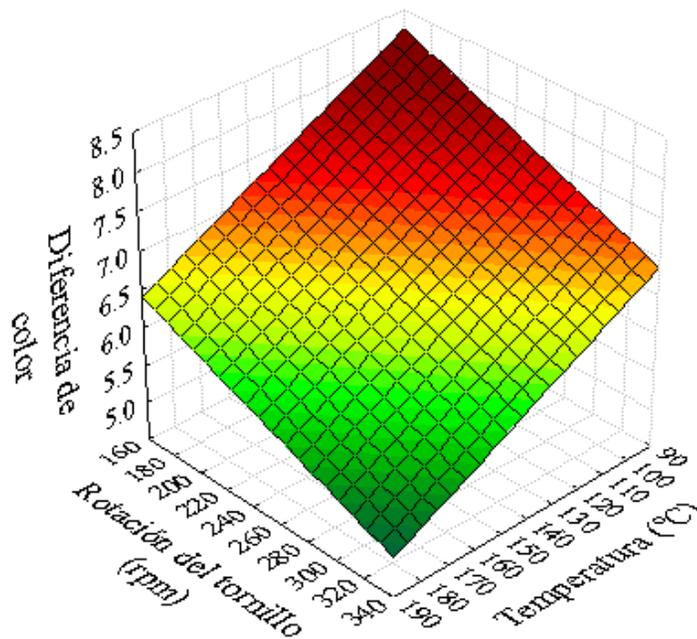


Figura 20. Efecto de la temperatura de la tercera zona del extrusor y la rotación del tornillo sobre la Diferencia de color de la harina mixta (quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado).

Se observaron (Cuadro 17) coeficientes significativos para rotación de tornillo lineal y para la interacción entre la temperatura y la rotación, esto dio como resultado una expresión matemática (Ecuación 24) con la ayuda de la utilización de un modelo estadístico de superficie de respuesta. El ajuste fue de 61% lo que nos dicta que fue un modelo tendencioso con un 39% de error experimental que pudo deberse a la descalibración del equipo o la toma errónea de  $L$ ,  $a^*$  y/o  $b^*$  ya que la diferencia de color depende de éstas.

**Función de utilidad.** Los valores óptimos obtenidos de las variables independientes con los resultados alcanzados en éste experimento, para la obtención de una harina mixta pregelatinizada de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado con las características deseables a utilizar en el procesamiento son: 154.52 °C con una rotación del tornillo a 320.70 rpm.

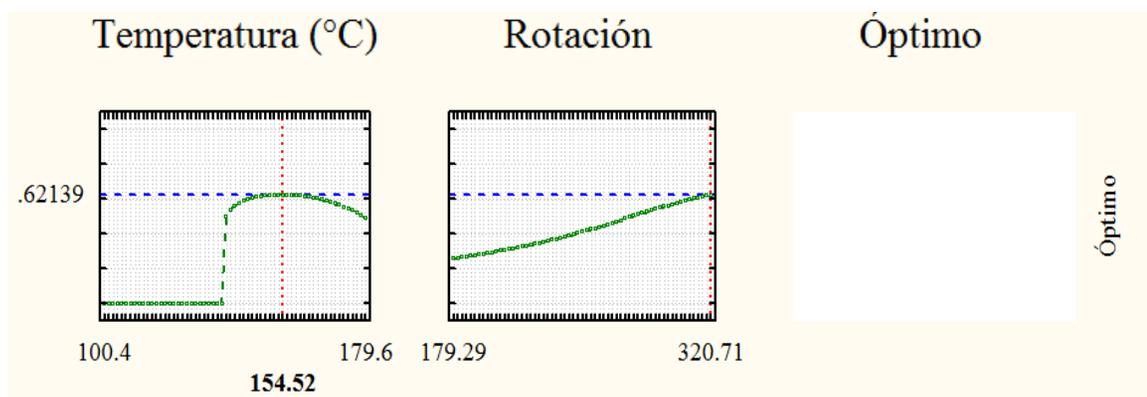


Figura 21. Valores óptimos de las variables independientes sobre el la temperatura y la rotación de tornillo para la obtención de harina mixta pregelatinizada de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado.

**Análisis centesimal.** Se realizó un análisis centesimal en Embrapa Agroindústria de Alimentos donde se observó la diferencia entre una harina mixta cruda y una harina mixta extruida (Cuadro 18).

Cuadro 18. Análisis centesimal del tratamiento 7 en comparación con una muestra de harina mixta cruda.

Parámetro	Harina mixta cruda	Tratamiento 7
Humedad (g/100g)	10.97	9.20
Cenizas (g/100g)	1.40	1.41
Proteína (g/100g)	10.12	10.01
Extracto etéreo (g/100g)	1.55	0.51
Fibra alimentaria (g/100g)	3.53	4.67
Carbohidrato (g/100g)	72.43	74.29
Valor calórico (Cal/100g)	344.15	341.75

g/100g = g de parámetro / 100g de muestra

En el momento en que se somete una harina mixta cruda a extrusión termoplástica los macro y micro nutrientes presentes en el sistema se vuelven más disponibles por el tratamiento térmico y de presión al que fue sometido, su matriz principal cambia para volverse más disponible.

En la extrusión ocurren cambios estructurales y químicos como la desnaturalización de proteínas (Guy 2011) y por lo tanto, mejor digestibilidad, también se da la gelatinización de almidones (Ascheri 2006) que modifican en su viscosidad, además existe formación de complejos entre los componentes y otras reacciones (Ferreira *et al.* 2014).

En éste caso la harina mixta cruda (Cuadro 18) tiene valores nutricionales los cuales a lo largo de la extrusión se mantuvieron muy similares como se observa con el tratamiento 7. La diferencia radica que en la disponibilidad en la que se encuentran. Una harina comercial Fortaliz (quinua, trigo y avena) contiene: proteína 17 g/100 g, grasas totales 7 g/100 g, fibra

0 g/100g y con un valor calórico de 396 Cal/100 g. Al compararlo con las harinas mixtas crudas se puede ver que unos valores con más altos que otros pero que están cerca, en el caso del tratamiento 7 (Cuadro18) los valores se conservan casi en todos los parámetros. Por éstas razones al comparar las diferentes harinas se puede decir que la harina obtenida mixta extruida puede ser del mismo tipo de uso que una harina mixta comercial usada para coladas y sopas, con la diferencia de que su estructura química está más biodisponible y que sus puntos de viscosidad con calor y agitación son menores que una harina mixta cruda.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se verificó que es posible elaborar una harina extruida pregelatinizada usando una mezcla de quínoa 20%, frijol caupí 15% y arroz parbolizado 65% y con el 16% de humedad inicial.
- Se alcanzaron modelos predictivos para Índice de expansión radial (IER), Índice de solubilidad en agua (ISA), Índice de absorción en agua (IAA), propiedades viscoamilográficas y análisis de color para a, b y  $\Delta E$ .
- Para elaborar una harina mixta pregelatinizada con la mezcla de ingredientes establecida se debe usar 154.52 °C y 320.70 rpm.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Realizar un análisis centesimal enfocado en aminoácidos para evaluar el beneficio nutricional de la harina mixta pregelatinizada.
- Realizar un análisis sensorial para determinar la aceptación en general de la harina a los potenciales consumidores.
- Mover los puntos centrales guiándose en los valores obtenidos en la función de optimización.
- Utilizar la misma materia prima realizar una extrusión termoplástica con los parámetros del estudio, pero con mayor humedad inicial del producto.

## 6. LITERATURA CITADA

Alvarez-Martinez L, Koundury K, Harper. 1988. General model for expansion of extruded products. *Journal of Food Science*, Chicago, v.53, n. 2, p. 609-615.

Anderson R, Conway H, Pfeifer V, Griffin Jr L. 1969. Gelatinization of Corn Grits by Roll-and Extrusion-Cooking. *Cereal Science Today*, Saint Paul, v. 14, n. 1, p. 4-11.

Anon. 1994. AACCNET. Relationship Between Funtional Properties and Molecular Modifications of Extruded Corn Starch, [consultado el 16 ago. 2016]. [http://www.aaccnet.org/publications/cc/backissues/1994/Documents/71\\_364.pdf](http://www.aaccnet.org/publications/cc/backissues/1994/Documents/71_364.pdf)

Ascheri D, Andrade T, Carvalho C, Ascheri J. 2006. Obtenção de farinhas mistas pré-gelatinizadas a partir de arroz e bagaço de jabuticaba: efeito das variáveis de extrusão nas propriedades de pasta. *Boletim CEPPA*, Curitiba, v.24, n.1, p. 115-144.

Ascheri D, Pereira L, Bassinello P, Carvalho C & Ascheri J. 2010. Calidad del arroz de tierras altas en función del tiempo de cocción y del cultivar de arroz. *Scientia Agraria*. 11:163-173.

ASCHERI J. 2010. Curso de processo de extrusão de alimentos: aspectos tecnológicos para o desenvolvimento e produção de alimentos para consumo humano e animal. EMBRAPA. 88p.

Bello M. 2009. Procesamiento hidrotérmico de arroz cáscara. Efecto de las condiciones de hidratación y cocción en el rendimiento, textura y propiedades térmicas del grano elaborado [Tesis]. Universidad de Buenos Aires - Buenos Aires. 208.

Bhattacharya S, Sivakumar V, Chakraborty D. 1997. Changes in CIELab colour parameters due to extrusion of rice-greengram blend: a response surface approach. *Journal of Food Engineering*. Kidlington, v.32, p.125-131.

Bouzaza D, Arhaliass A, Bouvier J. 1996. Die design and dough expansion in low moisture extrusion-cooking process. *Journal of Food Engineering*. n. 29, p. 139-152.

Box G, Hunter G. Hunter, J.S. *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building*. New York: John Wiley & Sons, 1978.

Box G, Wetz J. 1973. Criteria for judging adequacy of estimation by approximate response function. University of Wisconsin. Technical Report, n. 9.

Box G, Draper N. 1967. *Empirical model-building with response surface*. A book published.

Box G., Hunter J, Hunter W. 1978. *Statistics for Experimenters* 2nd ed. P. Bloomfield, ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Camire M, Camire A, Krumhar K, 1990. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Food Science and Nutrition*. 29 (1). 35-57 pp.

Carvalho C, Ascheri J, Takeiti C. 2011. Curso de processo de extrusão de alimentos: aspectos tecnológicos para o desenvolvimento e produção de alimentos para consumo humano e animal. EMBRAPA – Agroindústria de Alimentos.

Carvalho R, Ascheri J, Cal-Vidal J. 2002. Efeito dos parâmetros de extrusão nas propriedades físicas de extrusados (3G) de misturas de farinhas de trigo, arroz e banana. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 26, n. 5, p. 1006-1018.

Coello K. 2011. Alternativas de aprovechamiento de subproductos de soya y maíz de la agroindustria ecuatoriana para el desarrollo de productos dirigidos a la alimentación social, Tesis, Universidad de Guayaquil, 93.

Dogan H, Karwe M. 2003. Physicochemical properties of quinoa extrudates. *Food Science and Technology International*, v. n. 2, 101–114.

Ferreira F, Ramirez D, Wanderlei P, 2014. Propiedades reológicas y de adsorción de agua de harina extrudida de arroz y bagazo de cebada. *Revista Ceres*. 61 (3): 313-322.

García F. Martínez A. 2006. Evaluación de las isotermas de sorción en cereales para desayuno. *Superficies y Vacío*. 19 (1): 12-19.

Guy R. 2001. Raw materials for extrusion cooking. In: Guy R (ed.) *Extrusion cooking*. Boca Raton, Woodhead Publishing. p. 5-28.

Hashimoto J, Grossman M. 2003. Effects of extrusion conditions on quality of cassava bran/cassava starch extrudates. *International Journal of Food Science and Technology*, London, v. 38, n. 5, p. 511-517.

INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias) 2005. Variedad caupí de grano blanco y alto rendimiento para el litoral ecuatoriano [internet]. Quito: INIAP; [consultado 28 de julio del 2016]. Available from: <http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/INIAP%20463.%20Variedad%20de%20caupí%20de%20grano%20blanco%20y%20alto%20rendimiento%20para%20el%20Litoral%20Ecuatoriano..pdf>

Instituto Adolfo Lutz. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. 3ª edición. São Paulo, 1985, v. 1, 533p.

Launay B, Kone T. 1999. Twin-screw extrusion-cooking of corn starch: flour properties of starch pastes. In: ZEUTHEN, P.; CHEFTEL, J.C.; ERICKSSON, C.; JUL, M.; LEE, E.Y.; RYU, G.; LIM, S. Effects of processing parameters on physical properties of corn starch extrudates expanded using supercritical CO<sub>2</sub> injection. *Cereal Chemistry*, v. 76, n. 1, p. 63-69.

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.

- Lima C, Ascheri D, Bastos S. 2012. Características de adsorção de água de farinhas cruas e pré-gelatinizadas de duas variedades de arroz de terras altas. *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, 30:91-102.
- López J, 2012. El frijol caupí como alternativa en la seguridad alimentaria para el sector rural de Buenaventura. *Sabia*. 1 (1): 94-100.
- Lustosa, B.H.B.; Leonel, M.; Mischán, M.M. Effect of extrusion parameters on absorption and water solubility indexes of instant blends of cassava and casein. *Alimentos e Nutrição*, Araraquara, v. 20, n. 2, p. 223-229, abr/jun. 2009.
- Martínez M. 2012. Influencia de la adición de harinas extruídas en la elaboración de panes de arroz [Tesis]. Universidad de Valladolid – Palencia. 30.
- Moreno B, 2015. Rendimientos de arroz en cáscara en el Ecuador, primer cuatrimestre del 2015 [internet]. Quito: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. Dirección de análisis y procesamiento de la información, coordinación general del sistema de información nacional [consultado el 27 de julio del 2016]. [http://sinagap.agricultura.gob.ec/pdf/estudios\\_agroeconomicos/rendimiento\\_arroz\\_2015.pdf](http://sinagap.agricultura.gob.ec/pdf/estudios_agroeconomicos/rendimiento_arroz_2015.pdf)
- Nascimento E. 2010. Elaboração de produtos de milho enriquecidos com grãos e torta semi-desengordurada de gergelim por extrusão termoplástica, Tesis. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-Rio de Janeiro. 119 p.
- Nieto C. Vimos C. Monteros C. Caicedo C. Rivera M. 1992. INIAP-Ingapirca e INIAP-Tunkahuan dos variedades de quinua de bajo contenido de saponina. No. 228. Quito: Boletín Divulgatorio.
- Peralta E. 2009. La quinua en Ecuador “estado del arte”. 54 ed. Guayaquil: Revista Raíces Productivas. 16-18 pp.
- Peregrina P. 2000. Empleo de superficies de respuesta para la solución de problemas de inventarios estocásticos. Tesis. Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México. 40-53p.
- Pérez C, Betancourt D, Cassotto M, Carmona A, Tovar J, 2007. Efecto de la extrusión sobre la biodisponibilidad de proteína y almidón en mezclas de harinas de maíz y frijol lima. *Archivos latinoamericanos de nutrición*. 57 (3). 278-286 pp.
- ProEcuador, 2015. Análisis sectorial de la quinua 2015. [internet]. Quito: Instituto de promoción de exportaciones e inversiones [consultado el 2016 Jul 25]. [http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/10/PROEC\\_AS2015\\_QUINUA2.pdf](http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/10/PROEC_AS2015_QUINUA2.pdf)
- Rocha G. 2009. Obtencao e caracterizao de films biodegradáveis a partir de misturas de amido de amndioca e extrato protéico de soja. Tesis, Programa de pos-graduación en Ciencias e Tecnologia de Alimentos, Rio de Janeiro, Brasil, Universidad Federal Rural do Rio de Janeiro.
- Salazar S. 2013. Plan de marketing de arroz parbolizado de la “Piladora Salazar” Tesis, Universidad de Guayaquil. 112.

Shukla, S. 2009. Radiosterilization of Fluoroquinolones and Cephalosporins: Assessment of Radiation Damage on Antibiotics by Changes in Optical Property and Colorimetric Parameters. *AAPS PharmSciTech*. 2009 ;10(1):34-43. doi: 10.1208/s12249-008-9177-y. Epub 2009 Jan 15

Silva, D.J.; Queiroz, A.C. *Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos*. 3ª edição. Editora UFV: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 235p.

Silva, E. M. M. *Desenvolvimento e caracterização físico-química de extrudados de milho e feijão*. 2010. 230f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2010.

Silva E. 2007. *Produção de macarrão pré-cozido à base de farinha mista de arroz integral e milho para celíacos utilizando o processo de extrusão*. 2007. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro.

Tan J, Gao X, Hsieh F. 1994. Extrudate characterization by image processing. *Journal of Food Science*, v.59, p. 1247-1250.

Teba C. 2009. *Elaboração de massas alimentícias pré-cozidas à base de farinha mista de arroz polido e feijão preto sem casca pelo processo de extrusão termoplástica* [Tesis]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil

Teba S. 2014. *Desenvolvimento y caracterización de harinas mixtas extruidas de arroz y concentrado protéico de suero de leche bovino para la elaboración de bizcochos y papilla*. Para la obtención en doctorado en Ciencias de la Universidad Federal Rural de Rio de Janeiro. pp115

Torres L. 2005. Efeito da umidade e da temperatura no processamento de farinha de banana verde (*Musa acuminata*, grupo AAA) por extrusão termoplástica. *Boletim CEPPA*, v. 23, n. 2, p. 273-290.

Vargas J. 2013. *Obtenção e caracterização de farinha extrudada de diferentes genótipos de sorgo para o desenvolvimento de biscoitos doces, para la obtención de maestria en Ciencias de la Universidad Federal Rural de Rio de Janeiro*, pp 27.

Yu Y & Wang J. 2007. Effect of  $\gamma$ -ray irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of rice. *Food Research International*, 40:297-303.

## 7. ANEXOS

**Anexo 1.** Extrusor de tornillo único, Marca Brabender, Modelo 670237.001 (Alemania).



## Anexo 2. Análisis centesimal del tratamiento 7.

 Embrapa Agroindústria de Alimentos	<b>RESULTADO DE ANÁLISE</b>	Página 1 de 2
		Número R047816

### DADOS DO CLIENTE

Solicitante:	Jose Luis Ramirez Ascheri
Plano de Ação/Atividade:	03.14.01.001.00.03
Nome do Material:	Mix arroz, feijão e quinoa
Número da Requisição:	0255/2016
Data da Entrada:	04/05/2016
Data da Análise:	06/05 a 04/07/2016
Código CRA:	1601931 a 1601932

### RESULTADOS OBTIDOS

#### Umidade (g/100g)<sup>1</sup>

Código CRA	Identificação da Amostra	Resultados		Média
1601931	Mix cru	10,96	10,99	10,97
1601932	Farinha T7	9,05	9,19	9,12

#### Cinzas (g/100g)<sup>2</sup>

Código CRA	Identificação da Amostra	Resultados		Média
1601931	Mix cru	1,45	1,36	1,40
1601932	Farinha T7	1,41	1,41	1,41

Código CRA	Identificação da Amostra	Resultados		Média	Proteína
1601931	Mix cru	1,76	1,77	1,76	10,12
1601932	Farinha T7	1,75	1,74	1,74	10,01

#### Extrato Etéreo (g/100g)<sup>4</sup>

Código CRA	Identificação da Amostra	Resultados		Média
1601931	Mix cru	1,47	1,63	1,55
1601932	Farinha T7	0,43	0,59	0,51

#### Fibra Alimentar (g/100g)<sup>5</sup>

Código CRA	Identificação da Amostra	Resultados
1601931	Mix cru	3,53
1601932	Farinha T7	4,67

#### Carboidrato (g/100g)<sup>6</sup>

Código CRA	Identificação da Amostra	Resultados
1601931	Mix cru	72,43
1601932	Farinha T7	74,29

#### Valor Calórico kcal/100g<sup>6</sup>

Código CRA	Identificação da Amostra	Resultados
1601931	Mix cru	344,15

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento  
 Av. das Américas, 29.501 – Guaratiba – 23020-470 – Rio de Janeiro, RJ – Telefone (0xx21) 3622-9600 – Fax (0xx21) 3622-9713  
 Homepage: <http://www.embrapa.br/agroindustria-de-alimentos> - correio eletrônico: [ctaa.cra@embrapa.br](mailto:ctaa.cra@embrapa.br)

 <b>Embrapa</b> Agroindústria de Alimentos	<b>RESULTADO DE ANÁLISE</b>	Página 2 de 2
		Número R047816

1601932	Farinha T7	341,75
---------	------------	--------

#### OBSERVAÇÕES

- ❖ <sup>1</sup>Método: Am 5-04, AOCS – American Oil Chemists’ Society 2009.
- ❖ <sup>2</sup>Método: Gravimetria. Incineração a 550°C. POP FQ 011, rev. 3.
- ❖ <sup>3</sup>Método: Kjeldahl, POP FQ 012, rev. 3.
- ❖ <sup>4</sup>Método: Am 5-04, AOCS – American Oil Chemists’ Society 2009.
- ❖ <sup>5</sup>Método: Enzimático-Gravimétrico. POP FQ 015, rev.3.
- ❖ <sup>6</sup>Calculado segundo a Resolução – RDC n.º 360 de 23 de dezembro de 2003.
- ❖ O Resultado da Análise refere-se exclusivamente à amostra ensaiada, sendo o solicitante responsável pela amostragem e coleta do material.
- ❖ Este Resultado de Análise só pode ser reproduzido por completo e com autorização deste laboratório.
- ❖ Prazo máximo para pedido de contra prova de análise é de trinta dias, a partir da data de emissão do Resultado de Análise.

Rio de Janeiro, 04 de julho de 2016.

\_\_\_\_\_  
 Sidinéa Cordeiro de Freitas  
 Responsável Técnico  
 Laboratório de Físico-Química  
 “Dispensa assinatura quando consultado eletronicamente”

**Anexo 3.** Extruído de farinha mixta composta de quinoa, feijão-caupí e arroz parbolizado saindo do extrusor com matriz de 3mm.



**Anexo 4.** Tratamientos listos para ser secados en horno Elka a 50°C, posteriores a la extrusión termoplástica.



**Anexo 5.** Molino de disco de marca Laboratory Mill 3600



**Anexo 6.** Molino de disco de marca Laboratory Mill 3100



**Anexo 7.** Rotap en movimiento, modelo: Rx-29, junto con los tamices de diferentes aberturas de diámetro de malla.



**Anexo 8.** Balanza determinadora de humedad por infrarrojo marca Moisture Balance MOC-120-H



**Anexo 9.** Parámetros de extrusión, bitácora de Laboratorio de cereales, Planta 4, Embrapa, Agroindústria de Alimentos

27

23/02/2016

Extrusão de Amido, quinua, feijão cari:

Umidade: 16%  
 Matriz: 3,0 mm circular  
 Perfuro: 3:1  
 RPM: variavel  
 Temp: 50, 90; variavel  
 Alimentacao: ~ 25 rpm

Rotacao	Temperatura	horario
- 250	180°C	09:25
- 300	168°C	09:27
- 250	140°C	09:30
- 200	168°C	09:38
- 180	140°C	09:40
- 250	140°C	09:44
- 321	140°C	09:48
- 300	112°C	09:51
- 250	140°C	09:59
- 250	100°C	<b>10:03</b>
- 200	112°C	10:06
- 250	140°C	10:15
250	140°C	10:18 Ms/ha 16%
140	140°	10:24 Ms/ha 20%
		10:27

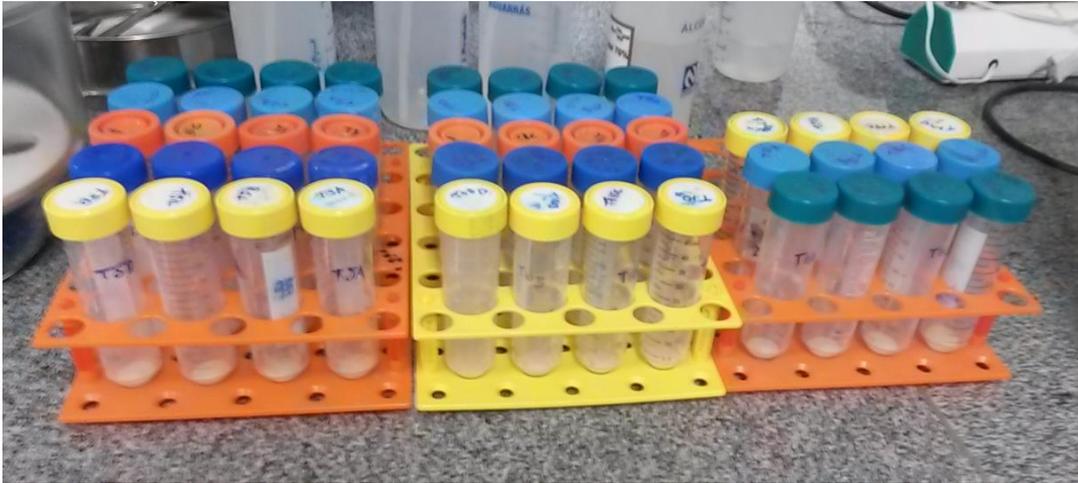
**Anexo 10.** Dispositivo en funcionamiento de Rapid Visco Analyser, lectura del tratamiento 5.



**Anexo 11.** Centrifugadora marca Hechich, modelo universal 320R, Alemania, Lista para funcionar utilizada en el análisis de ISA e IAA



**Anexo 12.** Tratamientos listos para ser sometidos a centrifugación para la determinación de ISA e IAA



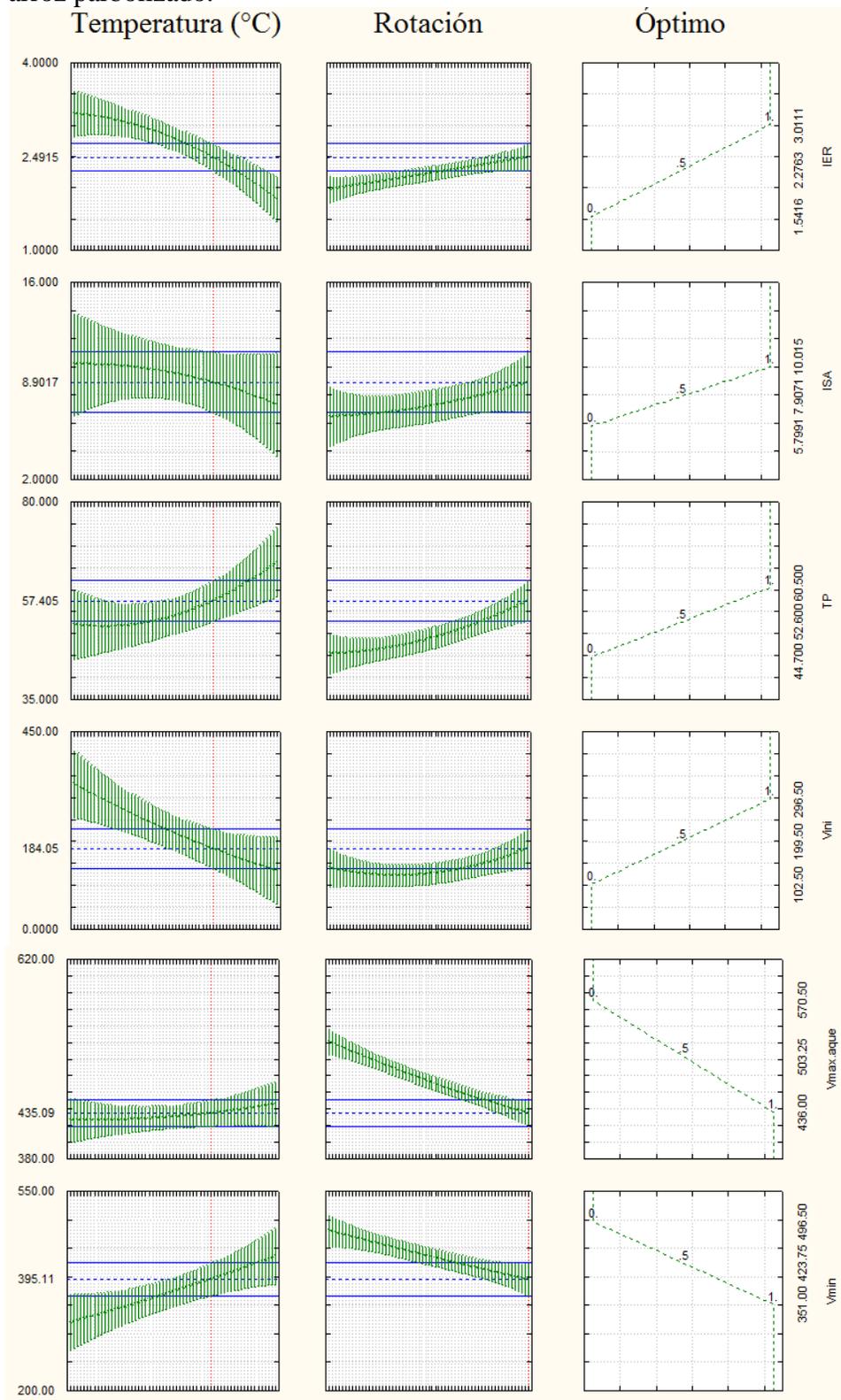
**Anexo 13.** Tratamientos después de ser centrifugados y retirado la parte soluble en agua, para determinación de ISA.

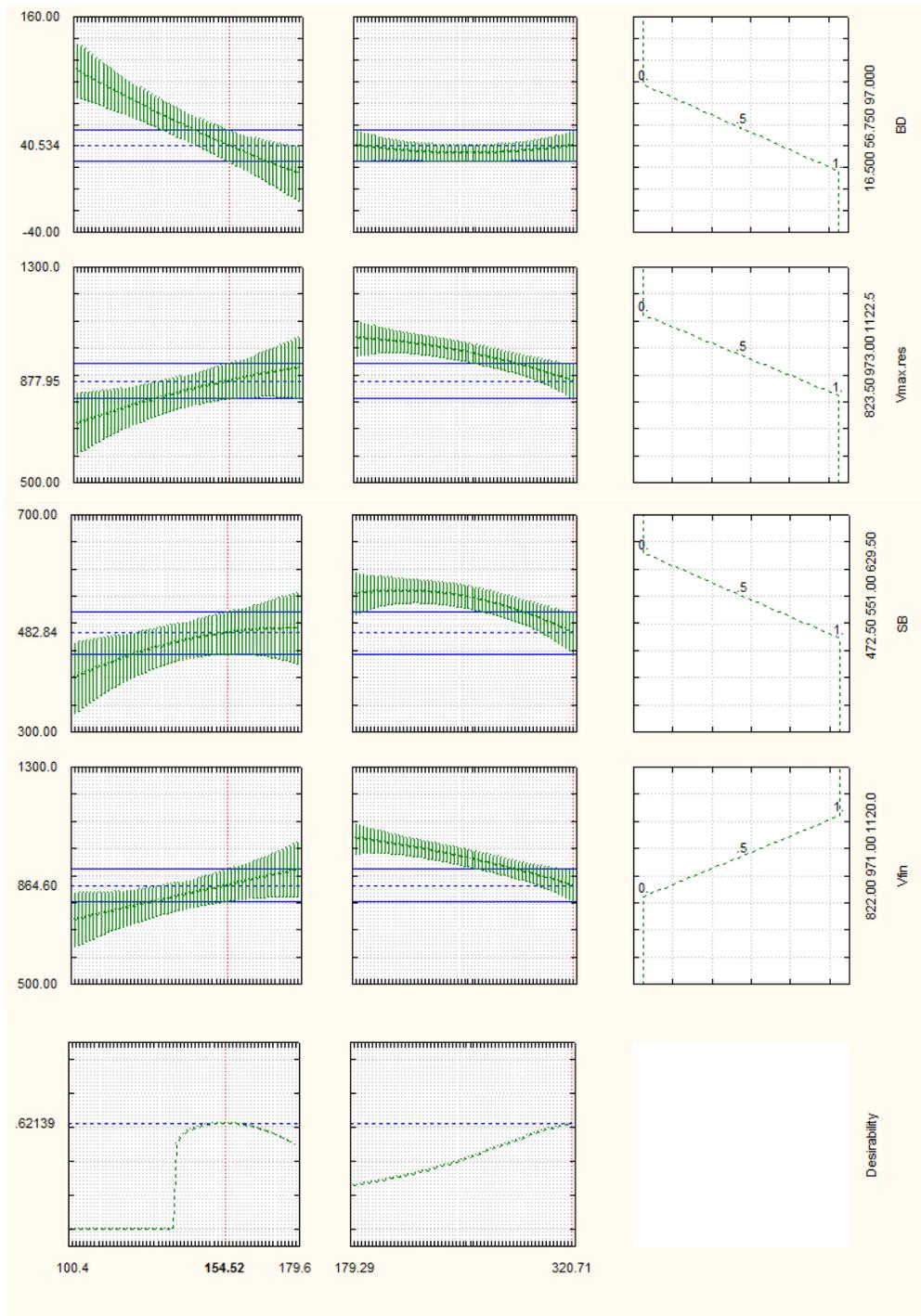


**Anexo 14.** Materia prima, de izquierda a derecha frijol caupí, arroz parbolizado y quínoa.



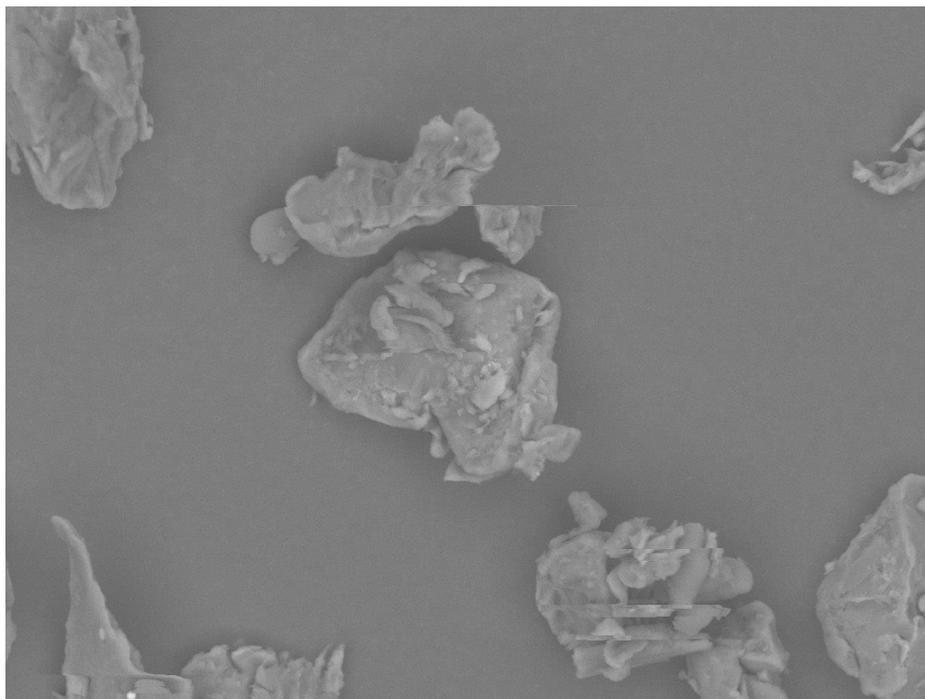
**Anexo 15.** Valores óptimos de las variables independientes sobre el la temperatura y la rotación de tornillo para la obtención de harina mixta pregelatinizada de quínoa, frijol caupí y arroz parbolizado.





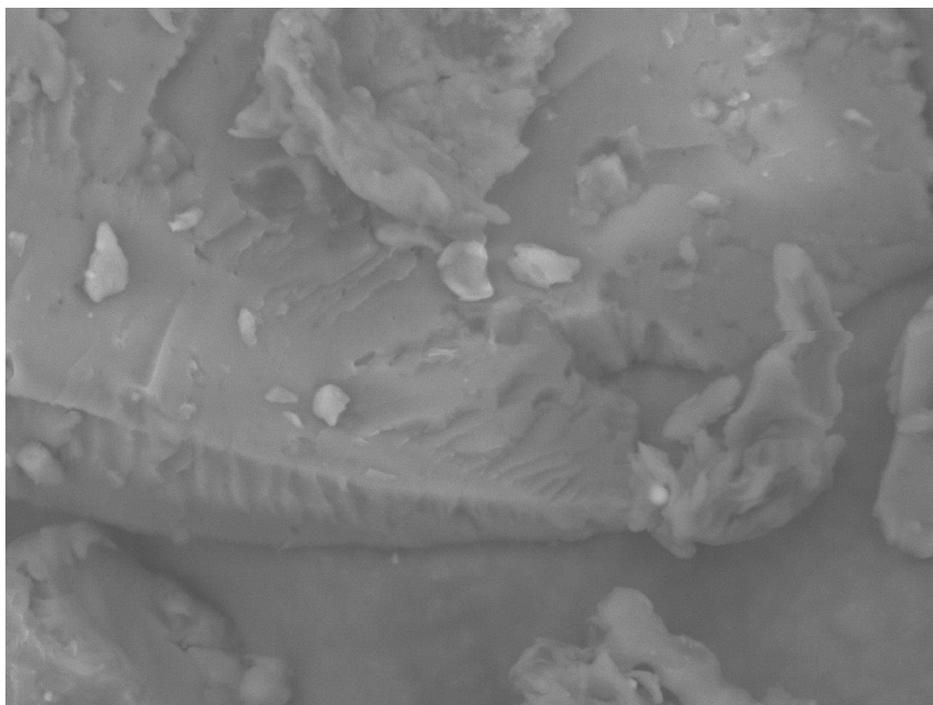
Dónde: TRT: tratamiento, Rot. Tornillo: Rotación del tornillo (rpm), Temp: Temperatura (°C), IER: Índice de Expansión Radial, ISA: Índice de solubilidad en agua, IAA: Índice de absorción en agua, TP: Temperatura inicial de pasta, Vini: Viscosidad máxima a frío, Vmax. Calent.: Viscosidad máxima, Vmin: Viscosidad mínima de enfriamiento, BD: Temperatura de quiebra, Vmax. enfria.: Viscosidad máxima en enfriamiento, SB: Tendencia a retrogradación, Vfin: Viscosidad final

**Anexo 16.** Fotografías de Microscopio electrónico de Barrido



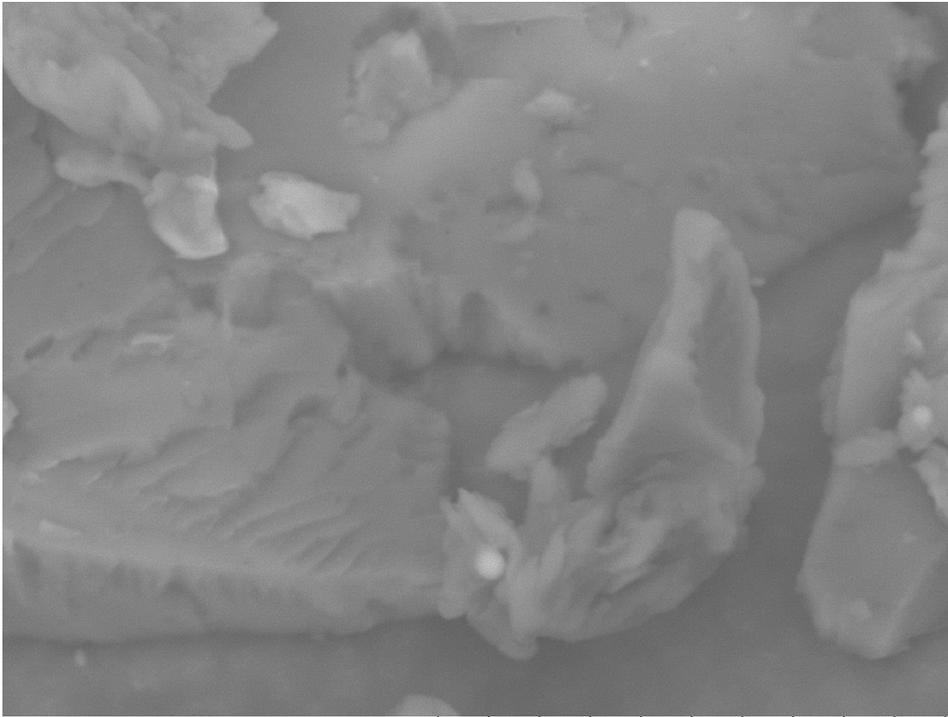
Maíz crudo  
(X1,0K)

2016/04/22 HL D7,7 x1,0k 100 um



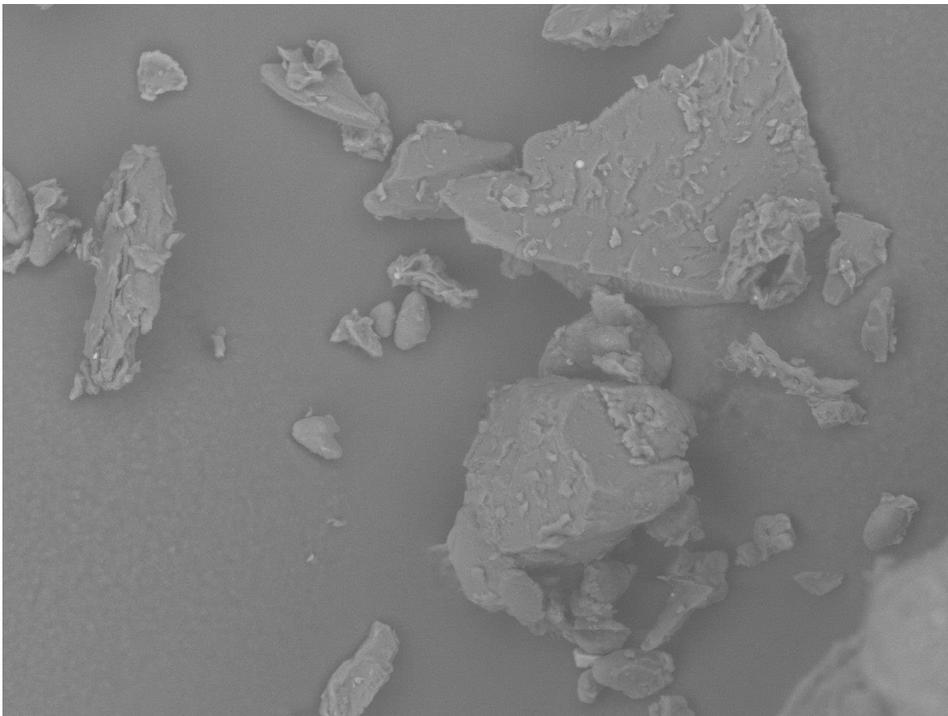
Maíz  
crudo  
(X2,0K)

2016/04/22 HL D7,7 x2,0k 30 um



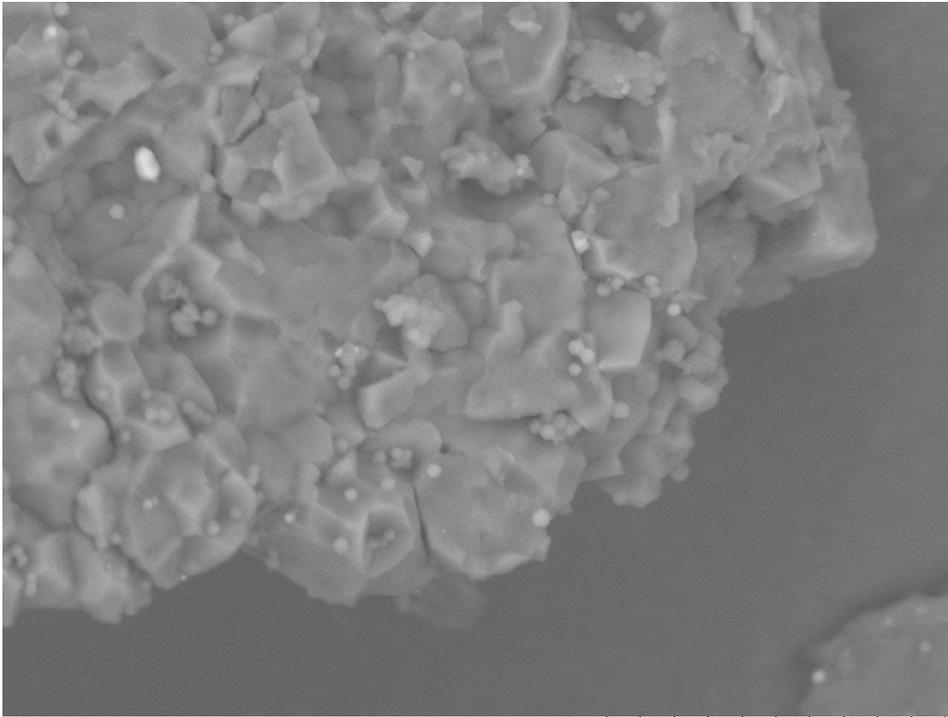
Maíz  
crudo  
(X3,0K)

2016/04/22 HL D7,7 x3,0k 30 um



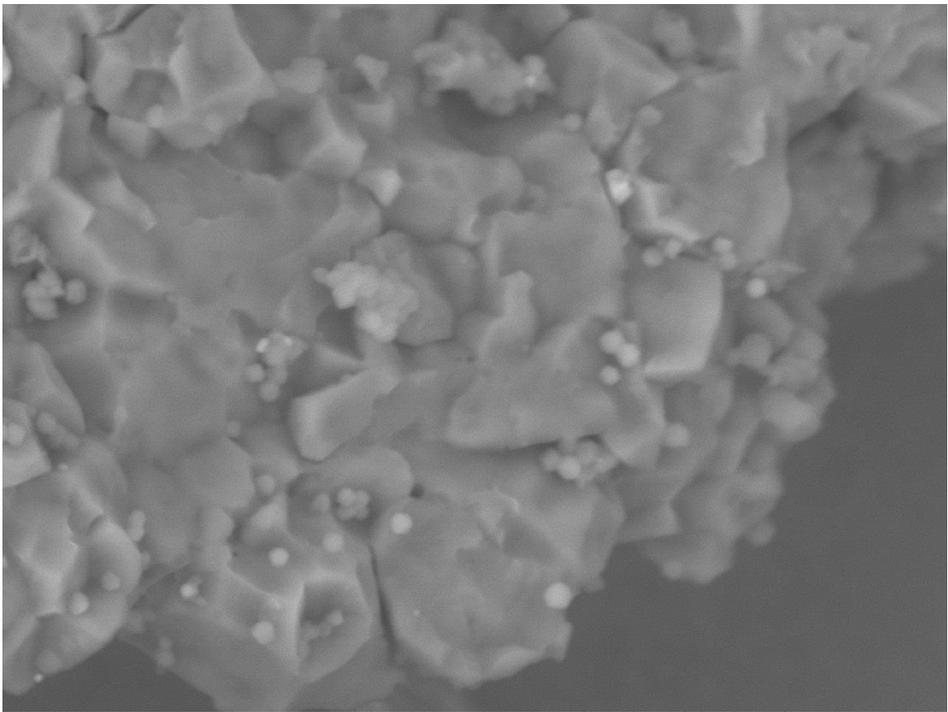
Maíz  
crudo  
(X500)

2016/04/22 HL D7,7 x500 200 um



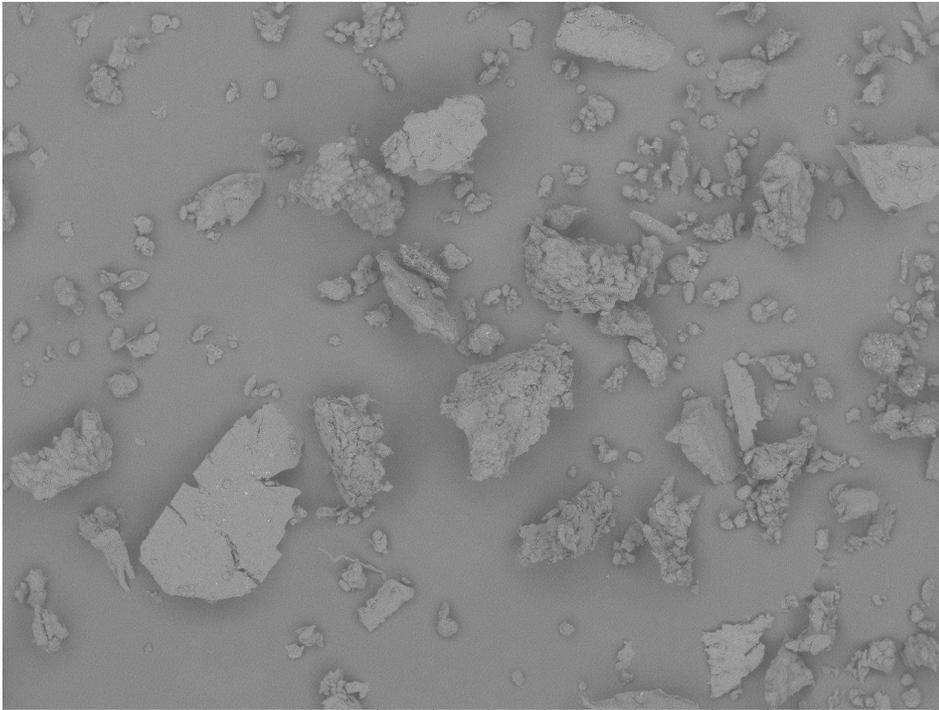
Harina  
mixta  
cruda  
(x2,0k)

2016/04/22 HL D6,6 x2,0k 30 um



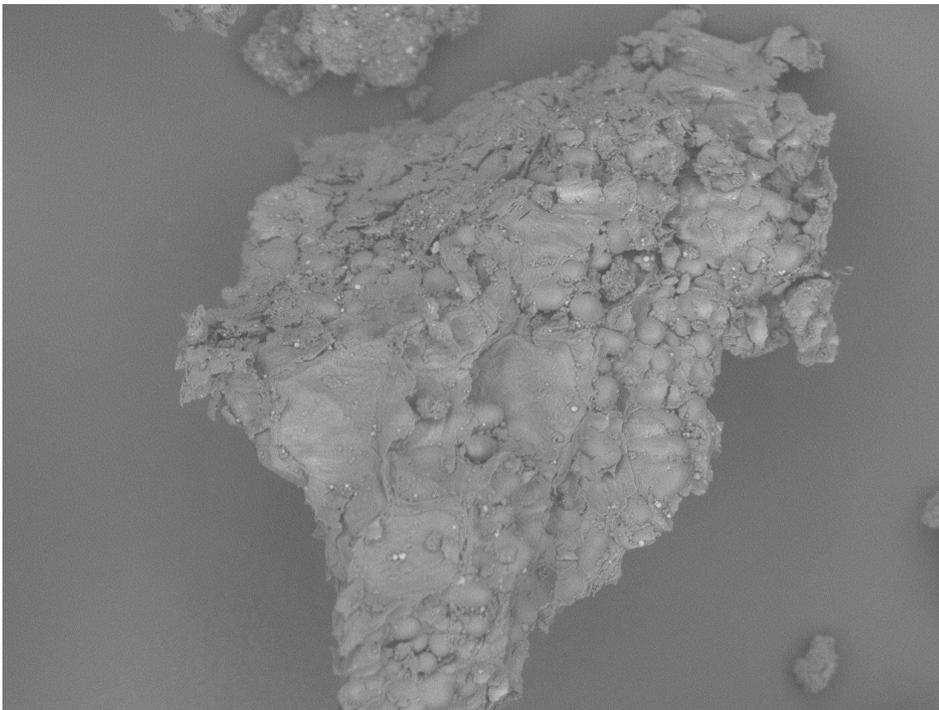
Harina  
mixta  
cruda  
(x3,0k)

2016/04/22 HL D6,6 x3,0k 30 um



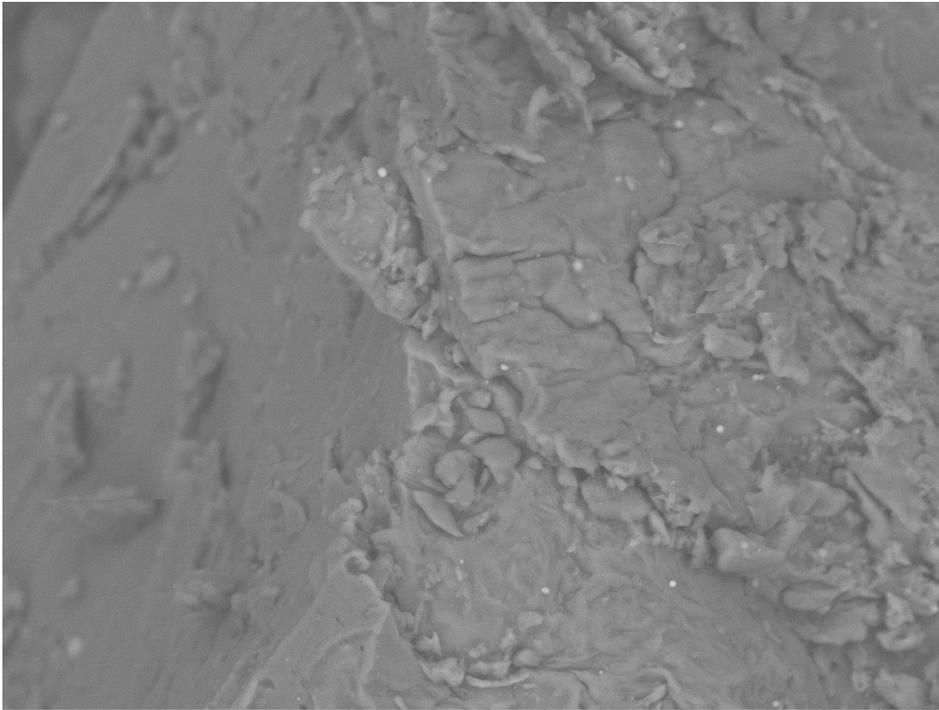
Harina mixta cruda (x100)

2016/04/22 F D6,5 x100 1 mm



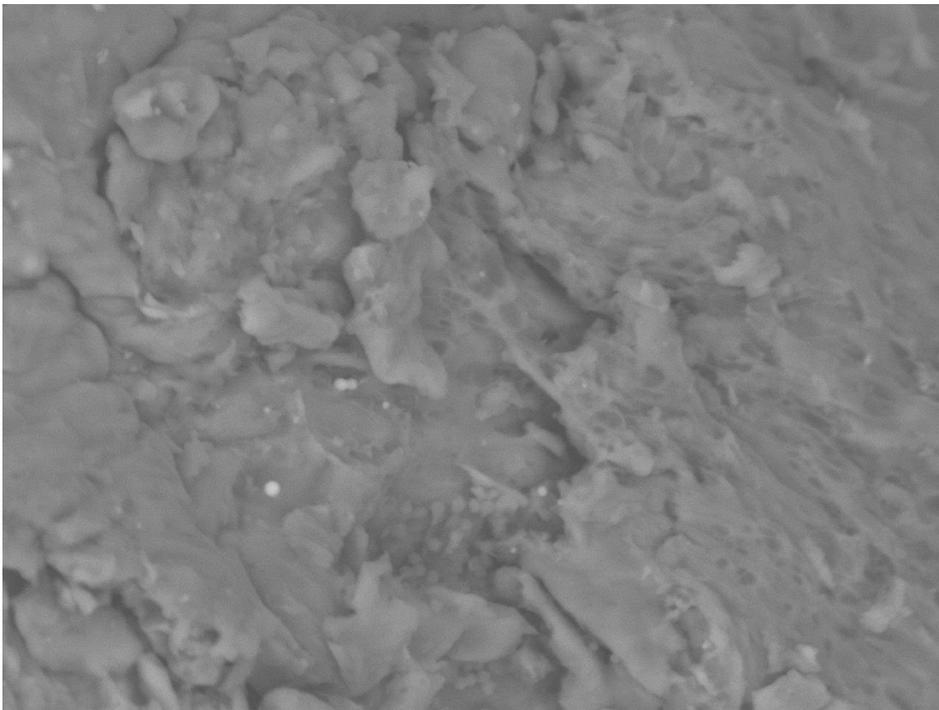
Harina mixta cruda (x500)

2016/04/22 F D6,4 x500 200 um



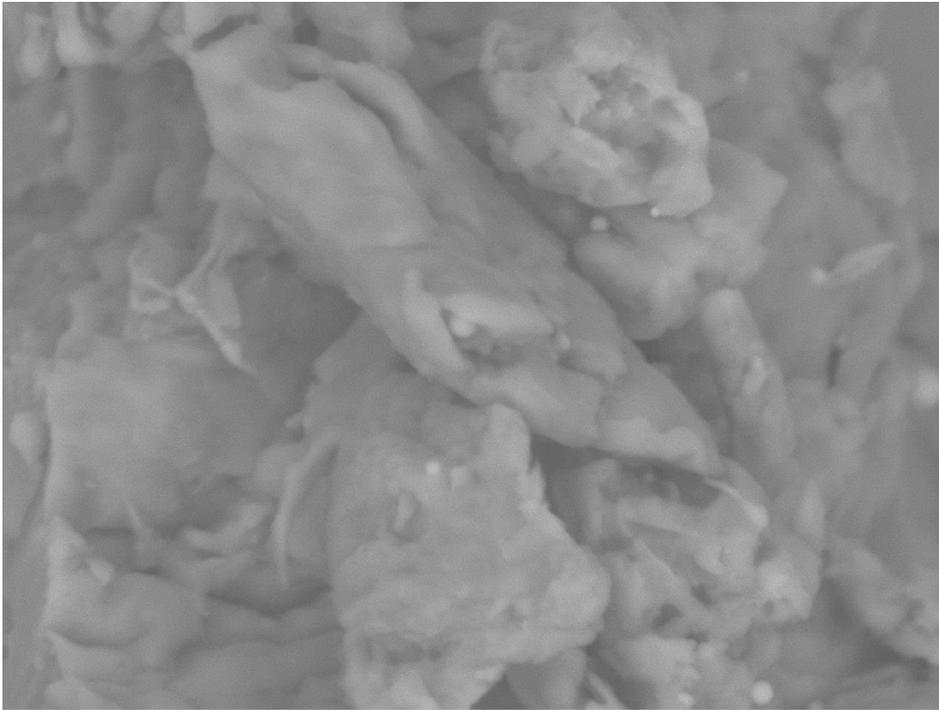
TRT 2  
(x1,0k)

2016/04/22 HL D7,6 x1,0k 100 um



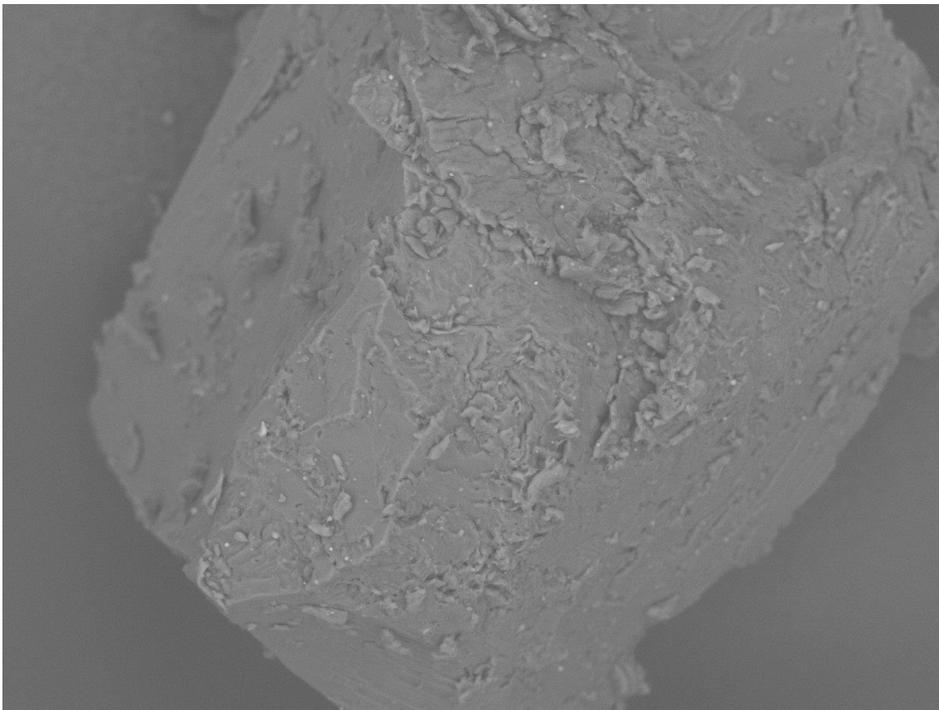
TRT 2  
(x2,0k)

2016/04/22 HL D7,7 x2,0k 30 um



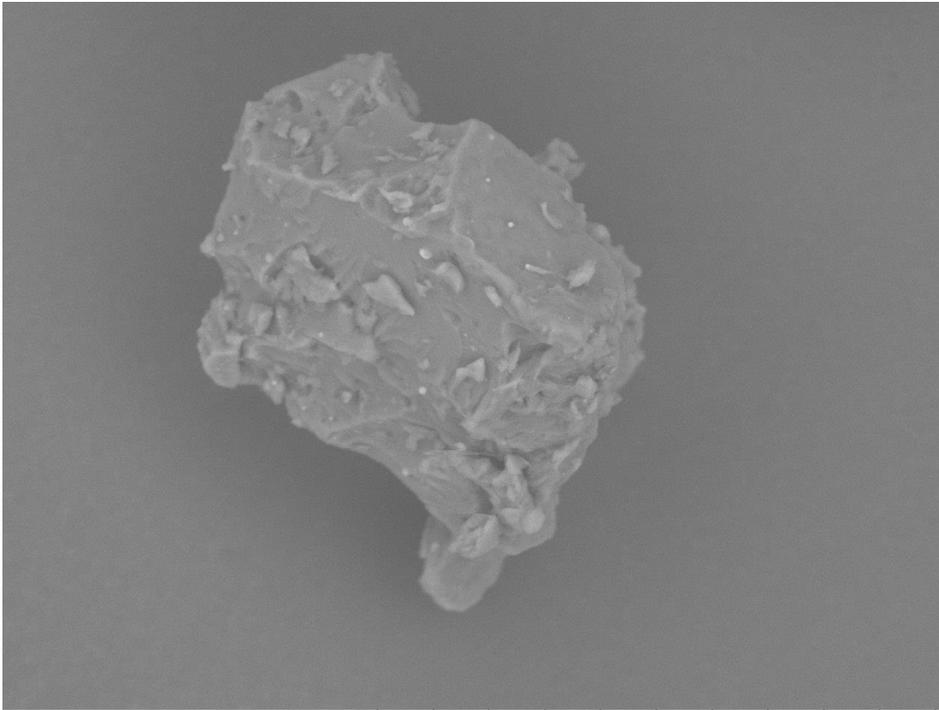
TRT 2  
(x3,0k)

2016/04/22 HL D7,7 x3,0k 30 um



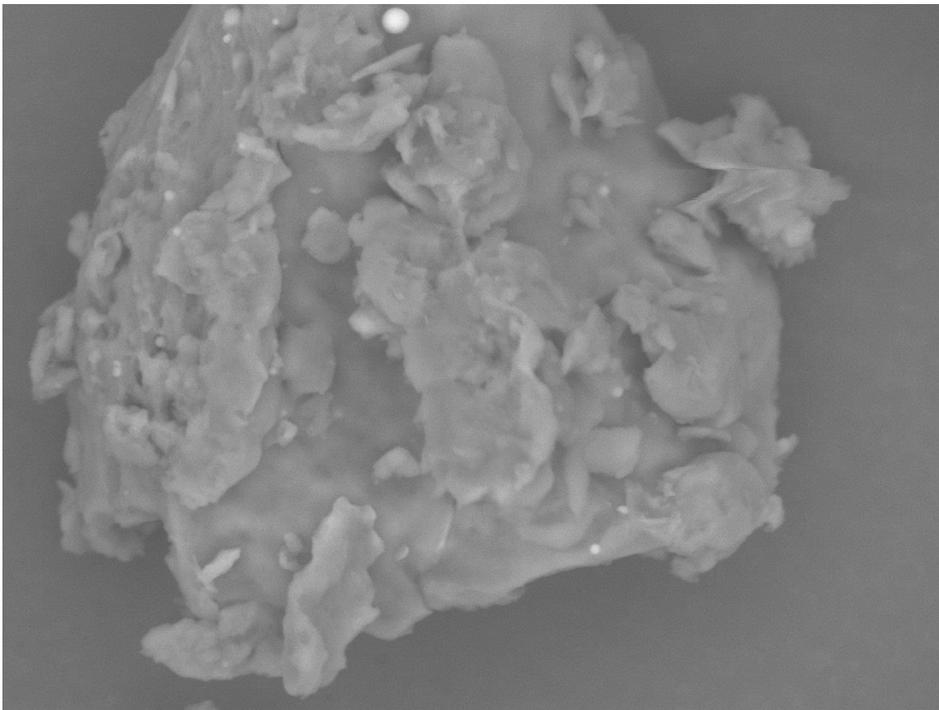
TRT 3  
(x500)

2016/04/22 HL D7,6 x500 200 um



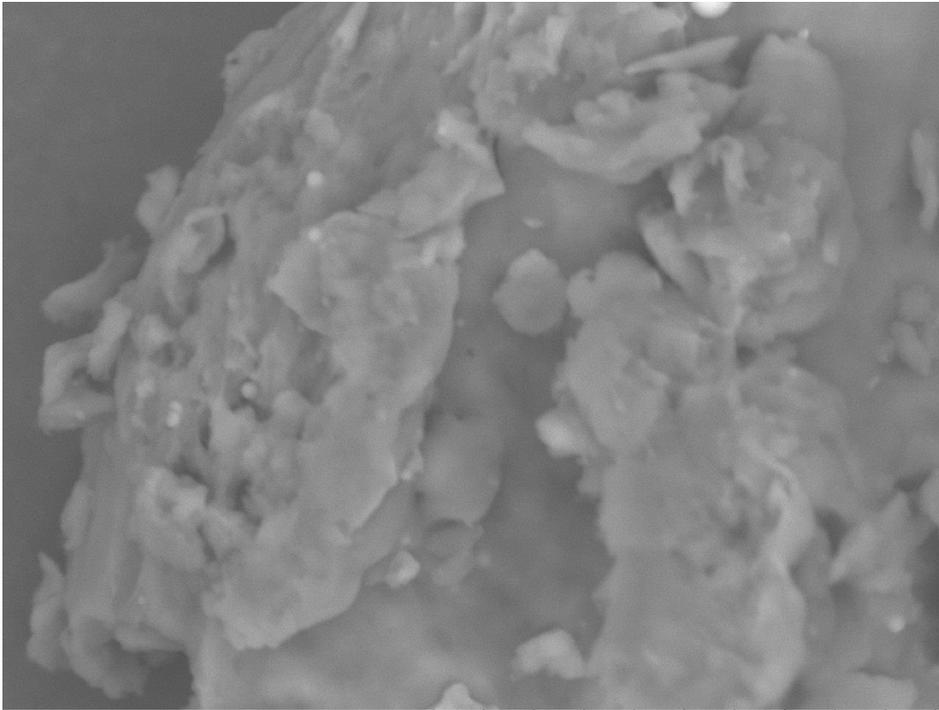
TRT 5  
(x1,0k)

2016/04/22 HL D6,8 x1,0k 100 um



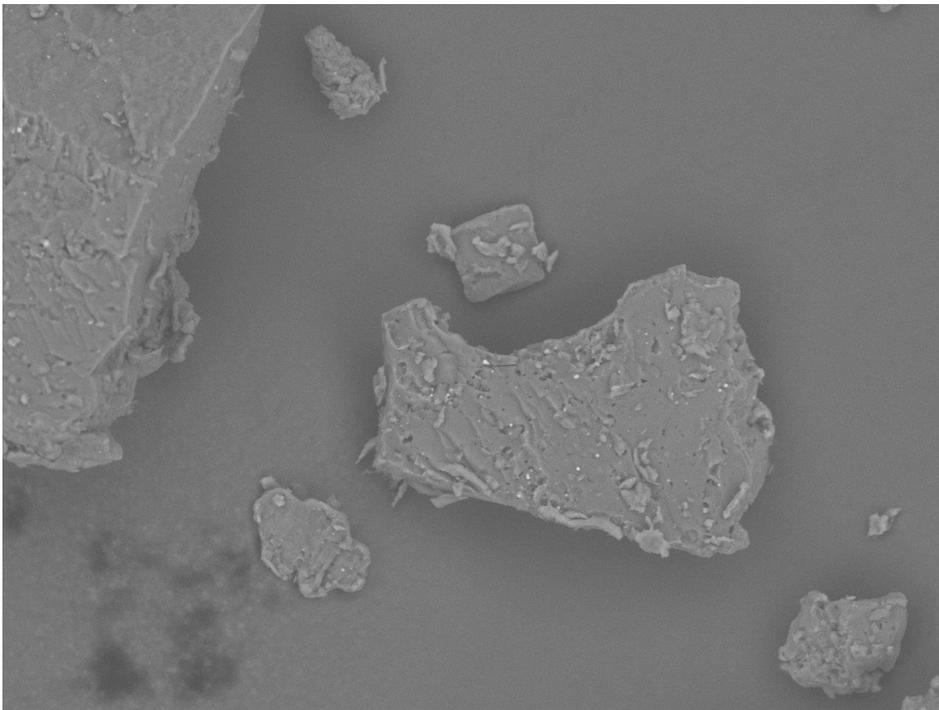
TRT 5  
(x2,0k)

2016/04/22 HL D6,8 x2,0k 30 um



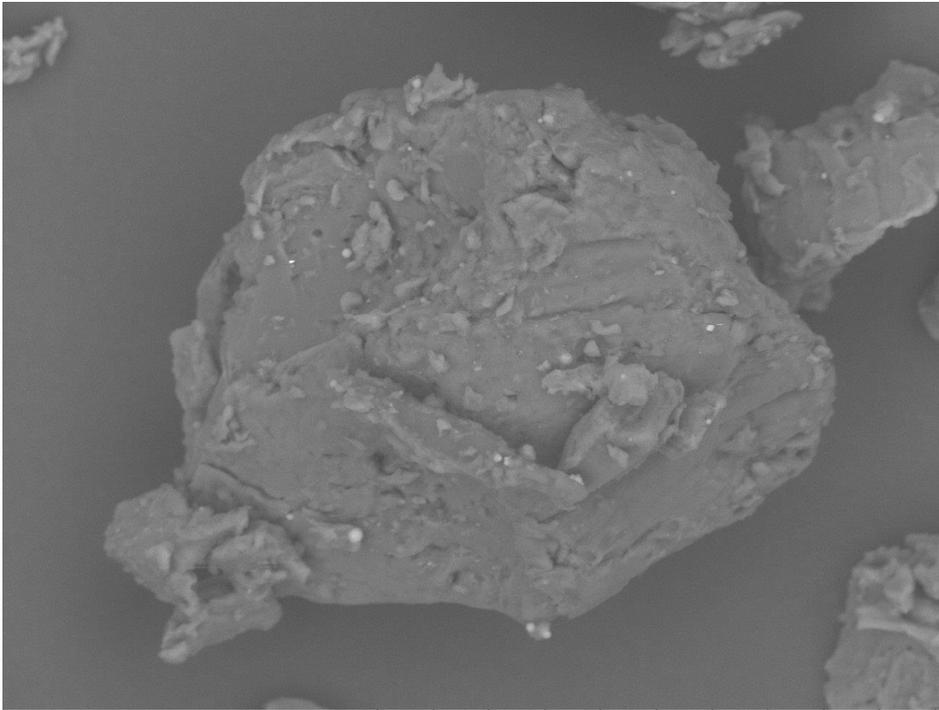
TRT 5  
(x3,0k)

2016/04/22 HL D6,9 x3,0k 30 um



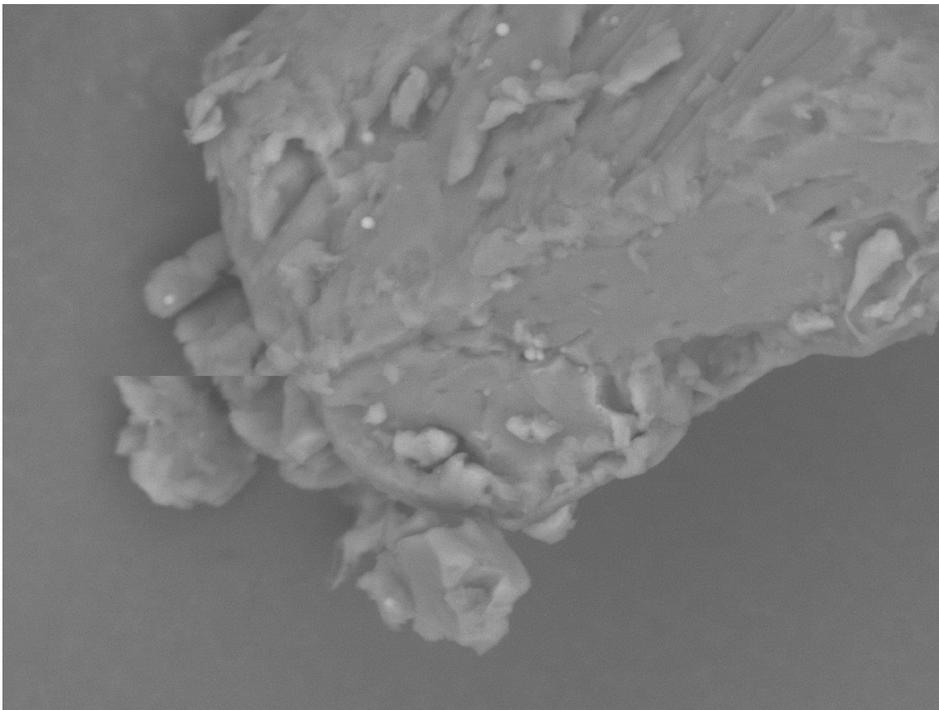
TRT 5  
(x500)

2016/04/22 HL D6,8 x500 200 um



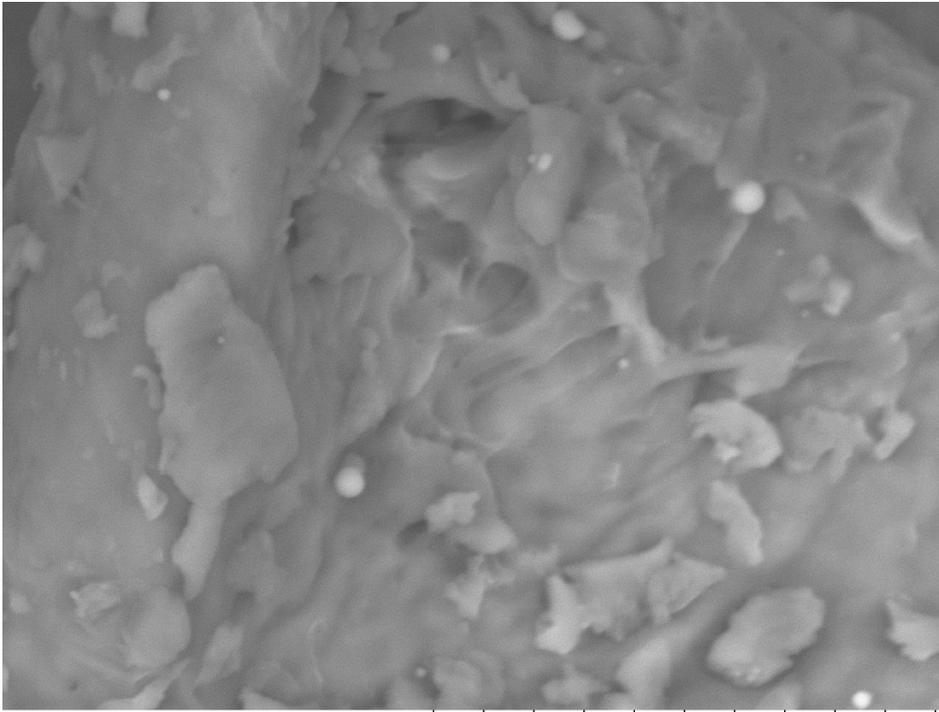
TRT 6  
(x1,0k)

2016/04/22 HL D7,2 x1,0k 100 um



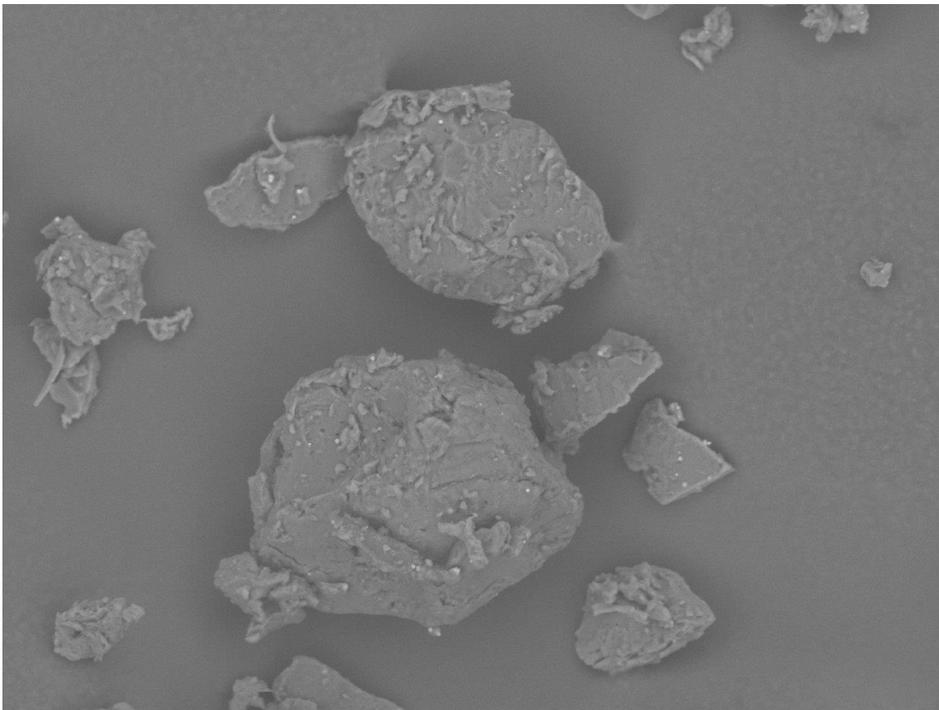
TRT 6  
(x2,0k)

2016/04/22 HL D7,2 x2,0k 30 um



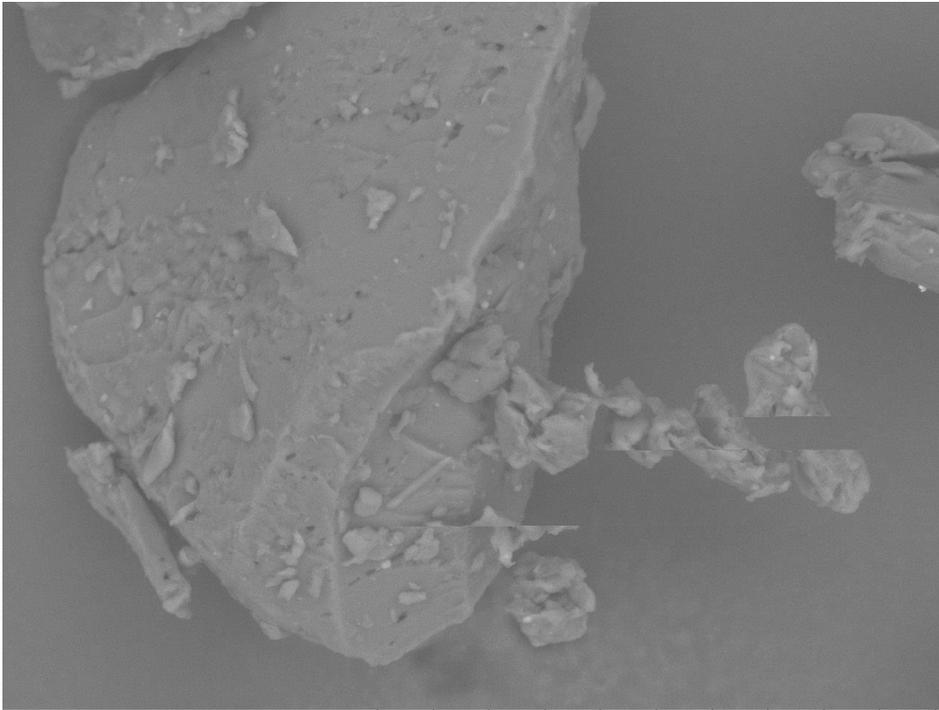
TRT 6  
(x3,0k)

2016/04/22 HL D7,2 x3,0k 30 um



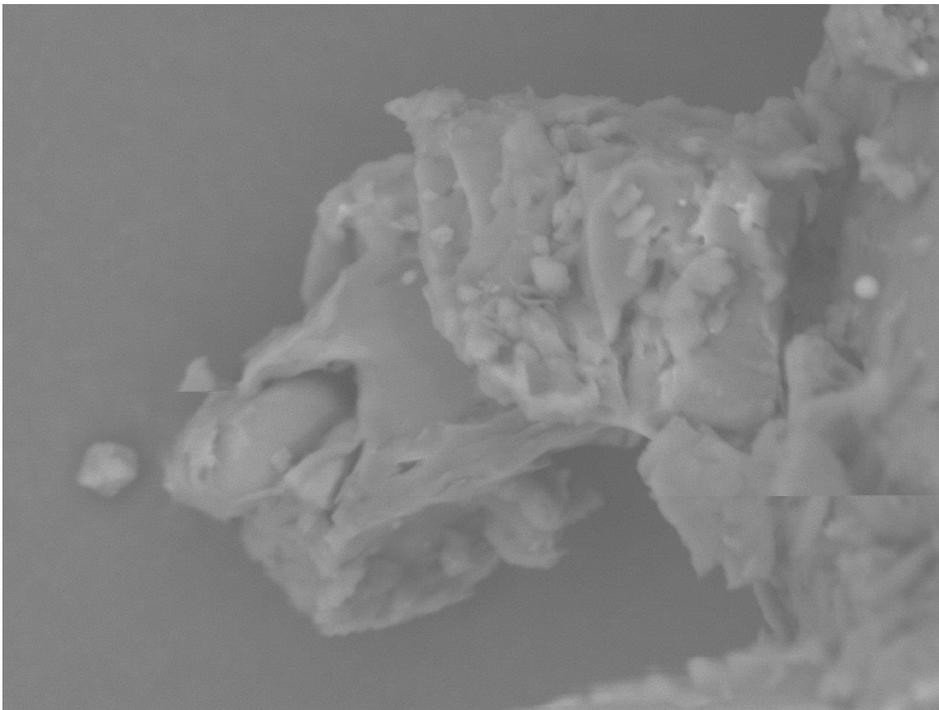
TRT 6  
(x500)

2016/04/22 HL D7,2 x500 200 um



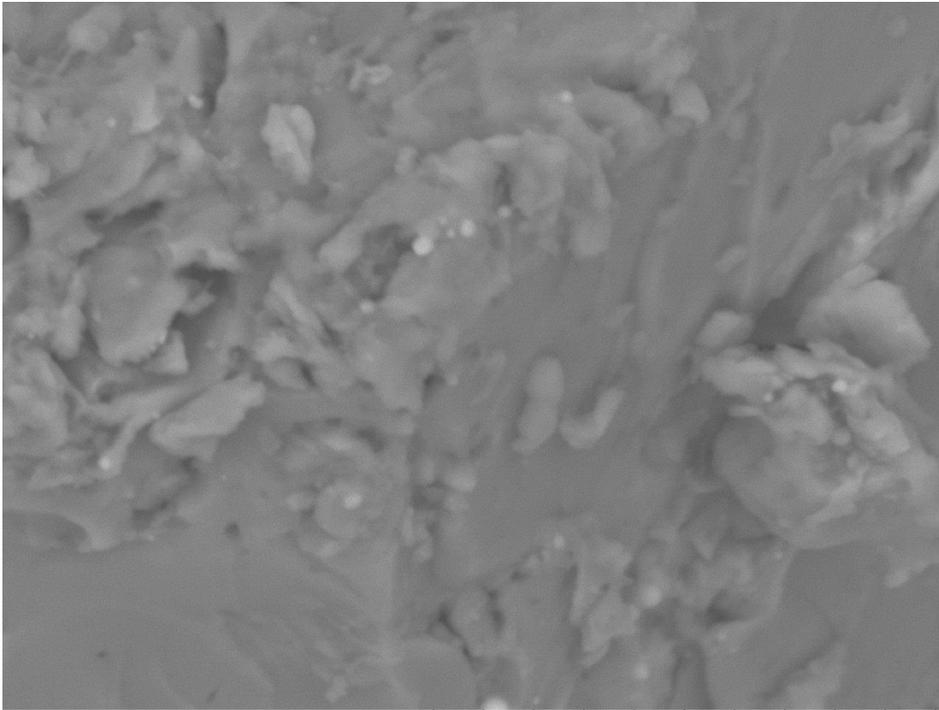
TRT 7  
(x1,0k)

2016/04/22 HL D7,7 x1,0k 100 um



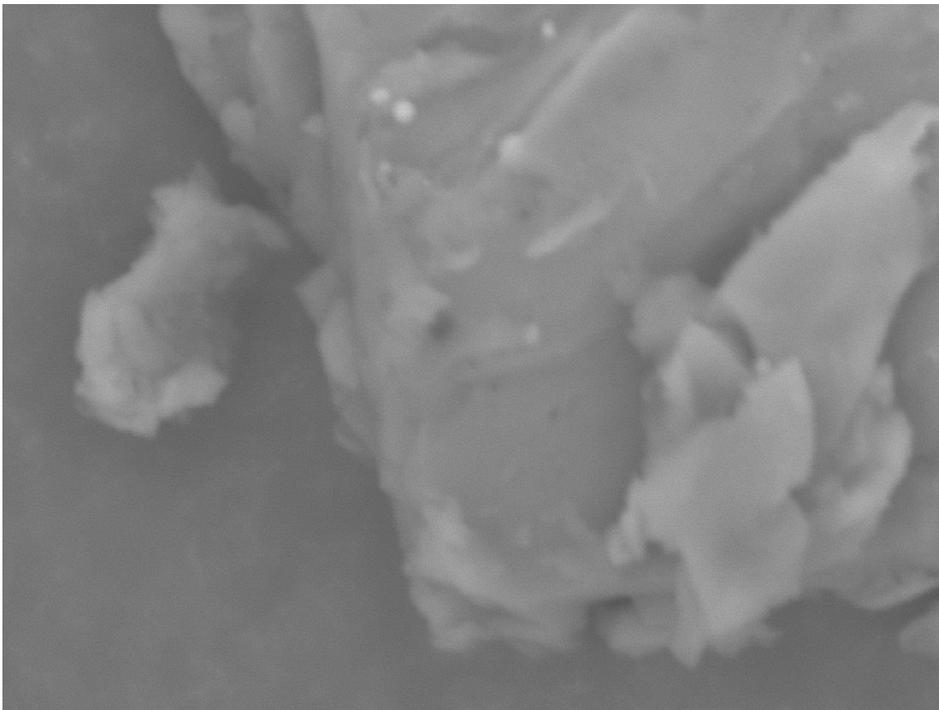
TRT 7  
(x2,0k)

2016/04/22 HL D7,7 x2,0k 30 um



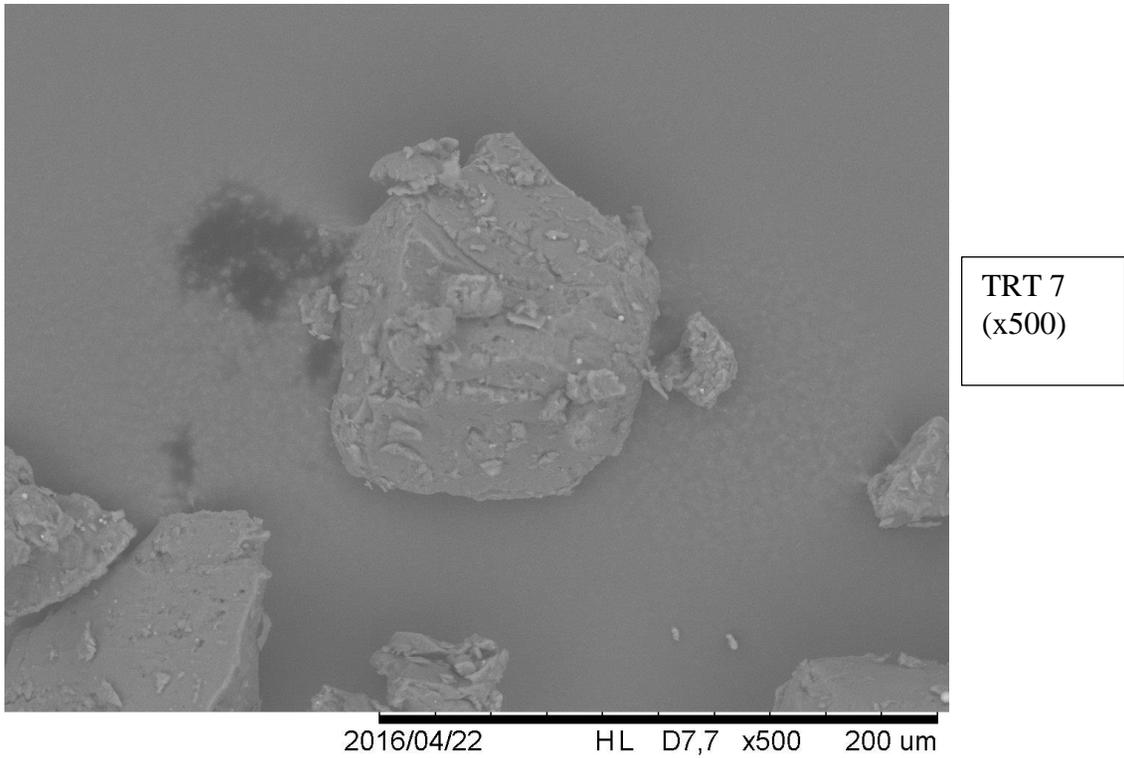
TRT 7  
(x3,0k)

2016/04/22 HL D7,7 x3,0k 30 um



TRT 7  
(x5,0k)

2016/04/22 HL D7,8 x5,0k 20 um



TRT = tratamiento

**Anexo 17.** Perfil de viscosidad de pasta de todos los tratamientos planteados.

