

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Utilización de ácido láctico y harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) extrudida en la elaboración de pan sin gluten**

**Elvia Luigina Murgueytio Riofrío**

**Stalin Santacruz, PhD, Director de Tesis**

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniera en  
Alimentos

Quito, Mayo de 2014

**Universidad San Francisco de Quito  
Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Utilización de ácido láctico y harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) extrudida en la elaboración de pan sin gluten**

**Elvia Luigina Murgueytio Riofrío**

Stalin Santacruz, Ph.D.  
Director de Tesis

.....

Javier Garrido, MSc.  
Coordinador de Ing. en Alimentos

.....

Lucía Ramírez Cárdenas, Ph.D.  
Miembro del comité de tesis

.....

Francisco Carvajal MSc.  
Miembro del comité de tesis

.....

Ximena Córdova, Ph.D.  
Decana del Colegio de Ciencias e Ingeniería

.....

Quito, mayo de 2014

©DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

.....

Elvia Luigina Murgueytio Riofrío

C.I.:1803787165

Quito, mayo de 2014

## Resumen

La elaboración de pan sin gluten presenta múltiples desafíos tecnológicos y nutricionales por lo que es necesario desarrollar y evaluar nuevos ingredientes y opciones tecnológicas para desarrollar productos libres de gluten de mejor calidad. En el presente estudio se escogió a la quinua como ingrediente principal por su buen perfil nutricional y la extrusión como proceso tecnológico que promete mejorar las características panificables de las harinas sin gluten junto con la adición de ácido láctico.

Para la elaboración de las harinas se evaluó la influencia de los factores de humedad y temperatura de extrusión en las variables de índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA). Los resultados muestran que el factor humedad influye significativamente en el IAA, existiendo así dos grupos de harinas, con alto y bajo grado de cocción.

En la elaboración de los panes se evaluó la influencia de dos factores, tipo de harina y porcentaje de ácido láctico, sobre las variables de volumen específico, dureza, elasticidad, número de celdas y tamaño de celda. Además se compararon las muestras con un control de harina comercial sin gluten y sin adición de ácido láctico. Se encontró que para el volumen específico sólo el ácido láctico tiene una influencia significativa, siendo el nivel bajo (0,2%) el que se relaciona con un mayor volumen específico en los panes. En cuanto al control, éste es diferente de los panes con nivel de ácido láctico alto (1%) e igual a los panes con nivel bajo.

Para la variable de dureza sólo fue significativo el factor de tipo de harina, mostrando que las harinas con mayor grado de cocción producen un pan más suave que las harinas de menor cocción y el control. En cuanto a la elasticidad, no hay diferencias significativas entre los tratamientos ni el control, de igual forma para número de celdas y tamaño de celda. Por lo que para estas variables los factores no tienen influencia significativa.

Finalmente se concluye que los panes elaborados a partir de harinas de quinua extrudida y con adición de ácido láctico presentan una mejoría en comparación con el control. Sin embargo, se necesita investigar más ampliamente los factores de estudio.

## **Abstract**

Due to the technological challenges in the production of gluten-free bread, it is important to develop and evaluate new ingredients and technological options to improve the quality of gluten-free products. For this study quinoa had been used as the main ingredient for its good nutritional profile, and extrusion as the technological process for improving the baking properties of gluten-free flours, enhanced by the addition of lactic acid.

For the production of extruded flours the influence of extrusion humidity and temperature on flour water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI) had been evaluated. Results shown that only humidity is the factor that affects the WAI, evidencing the existing of two groups of flours, ones with a high cooking degree and others with a low one.

For bread making the influence of the type of flour and level of lactic acid added to the batters was analyzed. The dependent variables were specific volume, crumb hardness, springiness, number of cells and cell size. The treatments also were compared with a control made of commercial gluten-free flour and without lactic acid addition. Results showed a significant influence of lactic acid on the specific volume. The lowest level of lactic acid (0,2%) is the one that develop the highest loaf volume. The control is different from the bread made with the highest level of acid lactic (1%) and similar to breads with a low level of lactic acid.

The type of flour used in bread making is the only factor that influences crumb hardness. Flours with a high cooking degree yield a softer crumb than flours with low cooking degree. No significant differences were found for the other variables. The factors did not influence the variables of springiness, cell number nor cell size.

As a conclusion, breads elaborated with extruded quinoa flour and lactic acid show an improvement compared with the control. However, a wider research of the factors analyzed here is needed.

## Tabla de Contenidos

1	Introducción.....	8
1.1	Antecedentes.....	8
1.2	Justificación.....	9
2	Objetivos e hipótesis.....	11
2.1	Objetivos.....	11
2.1.1	Objetivo general.....	11
2.1.2	Objetivos específicos.....	11
2.2	Hipótesis.....	11
3	Fundamentos Teóricos.....	12
3.1	Extrusión.....	12
3.2	Quinua.....	13
3.3	Ácido láctico.....	15
4	Materiales y métodos.....	17
4.1	Ingredientes para la producción de pan sin gluten.....	17
4.2	Producción de quinua pre-gelatinizada mediante extrusión.....	17
4.3	Preparación de harina de quinua extrudida.....	18
4.3.1	Índice de absorción de agua.....	18
4.3.2	Índice de solubilidad en agua.....	18
4.4	Elaboración de los panes.....	18
4.4.1	Volumen específico.....	19
4.4.2	Perfil de textura.....	20
4.4.3	Características de la miga.....	20
4.5	Métodos estadísticos.....	20
5	Resultados y Discusión.....	22
5.1	Propiedades funcionales de las harinas extrudidas de quinua.....	22
5.1.1	Índice de absorción de agua.....	23
5.1.2	Índice de solubilidad en agua.....	24
5.2	Propiedades físicas de los panes.....	25
5.2.1	Volumen específico.....	25
5.2.2	Perfil de textura.....	27
5.2.3	Características de la miga.....	30

5.3 Elección del mejor tratamiento .....	34
6 Conclusiones y recomendaciones .....	35
7 Bibliografía citada .....	37

### **Lista de tablas y figuras**

Tabla 1 Diseño completamente al azar con arreglo factorial $2^2$ para la elaboración de harina de quinua extrudida.....	17
Tabla 2 Ingredientes para la elaboración de pan sin gluten .....	19
Tabla 3 Diseño factorial con dos factores para la elaboración de pan sin gluten .....	21
Tabla 4 Medias cuadráticas para las propiedades funcionales de las harinas extrudidas.....	22
Tabla 5 Valores medios de las propiedades funcionales de las harinas extrudidas (IAA)...	23
Tabla 6 Medias de las propiedades funcionales de las harinas extrudidas (ISA) .....	24
Tabla 7 Medias cuadráticas para volumen específico de los panes sin gluten .....	25
Tabla 8 Media cuadrática para volumen específico de los panes en estudio y el control .....	26
Tabla 9 Valores medios de volumen específico de los panes sin gluten .....	26
Tabla 10 Medias cuadráticas para dureza y elasticidad de los panes sin gluten.....	28
Tabla 11 Media cuadrática para dureza de los panes en estudio y el control .....	28
Tabla 12 Valores medios de dureza para los panes sin gluten.....	29
Tabla 13 Medias cuadráticas de elasticidad para los panes en estudio y el control.....	30
Tabla 14 Medias cuadráticas para características de la miga.....	31
Tabla 15 Media cuadrática para número de celdas – comparación con el control .....	31
Tabla 16 Valores medios de número de celda de los panes sin gluten .....	32
Tabla 17 Media cuadrática para tamaño de celda – comparación con el control .....	34
Tabla 18 Tabla de ponderación para seleccionar el o los mejores tratamientos .....	34
Fig. 1 Fotografías de los panes obtenidos para cada tratamiento .....	33

# 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes

La enfermedad celíaca o enteropatía por sensibilidad al gluten es una intolerancia permanente a la gliadina presente en el trigo y otras prolaminas asociadas que se encuentran en algunos cereales como el centeno (secalina), cebada (hordeina) y avena (avenina). (Bold & Rostami, 2011) Se caracteriza por presentarse como un síndrome de mala absorción intestinal, que es el resultado de una compleja interacción entre factores genéticos y nutricionales como la ingesta de gluten, y se la puede clasificar desde una mala absorción de nutrientes subclínica a severa, con anomalías histológicas de la mucosa duodeno yeyunal en la mayoría de los casos, además de otras manifestaciones no gastrointestinales como anemia, fatiga, osteoporosis e infertilidad. (Daitch & Epperson, 2011; Rostami Nejad *et al.* 2011) Esta intolerancia es de carácter permanente y el único tratamiento disponible al momento es la adherencia a una dieta libre de gluten de por vida, lo que resulta caro y con opciones limitadas de productos organolépticamente aceptables. (Mowat, 2003)

De los desórdenes relacionados al gluten, la enfermedad celíaca es una de las enfermedades inmunológicas más comunes, con una prevalencia superior al 1% a nivel mundial. (Mowat, 2003; Rostami Nejad *et al.*, 2011) Sin embargo, más del 90% de las personas con enfermedad celíaca son mal diagnosticadas (Daitch & Epperson, 2011) . Además, del 6 al 10% de la población general padecen de sensibilidad al gluten, y estos porcentajes están creciendo, pues muchos casos de enfermedad celíaca están siendo detectados debido a la creciente difusión de información de esta enfermedad. (Rostami Nejad *et al.*, 2011)

En Ecuador la incidencia de enfermedad celíaca es de 1 por cada 143 habitantes. (Celíacos del Ecuador, 2012) Estos no son datos oficiales; además, no hay datos para pacientes con otros desórdenes relacionados al gluten. Por otro lado, la legislación en cuanto a etiquetado de productos libres de gluten es inexistente, así como, la oferta de productos análogos a los que típicamente contienen gluten, tal es el caso de los productos de panificación. Todo esto evidencia una atención inadecuada por parte de las entidades de salud pública, así como, de la industria alimenticia a este grupo de la población que padece de dichos trastornos y merece ser atendida.



Dado que los desórdenes asociados al gluten no son sólo patologías que afectan al intestino sino que traen consigo una serie de enfermedades que se derivan de la incidencia en la mala absorción de nutrientes, es importante proveer a los pacientes con productos libres de gluten que tengan un alto valor nutricional para suplir la deficiencias en minerales y vitaminas que presentan, así como, para ayudar a restablecer el balance nutricional de su organismo. (Álvarez-Jubete, Arendt, & Gallagher, 2009)

## 1.2 Justificación

Estos problemas nutricionales plantean un desafío en la selección de los ingredientes que se utilizan en la formulación de los productos libres de gluten, pues hasta el momento, en especial en los productos de panificación, los principales componentes que sustituyen las propiedades del gluten son almidones refinados y mezclas de gomas, dándole a los productos una calidad nutricional y características organolépticas deficientes (Ahlborn *et al.*, 2005). Ante esta problemática, los pseudocereales como la quinua se presentan como alternativas innovadoras, poco explotadas y muy prometedoras por su composición nutricional. (Álvarez-Jubete, Arendt, & Gallagher, 2009)

Una de las características más relevantes de la quinua es su alto contenido proteico (14,5% b.s.), significativamente más alto que el del trigo (12% b.s.), y sobre todo seguro para dietas libres de gluten. Otra característica nutricional de la quinua, es la composición de ácidos grasos, siendo esta alta en oleico y linoleico. Además es una fuente rica en fibra y minerales, componentes deficientes en la dieta de pacientes con intolerancia al gluten. (Álvarez-Jubete, Arendt, & Gallagher, 2009; Houben, Höchstötter, & Becker, 2012)

A pesar de que la quinua es un ingrediente con características nutricionales ideales para la formulación de productos saludables, presenta un inconveniente tecnológico, su inhabilidad de formar masas o batidos con características viscoelásticas aptas para la panificación. Esto, debido a que sus proteínas no forman redes elásticas que retengan los gases de la fermentación, evitando así poder obtener la textura y demás características organolépticas propias del pan. Para suplir este problema tecnológico propio de las formulaciones en que no existe formación de gluten, es común que en las formulaciones se usen gomas y enzimas que fortalezcan la red proteica y de esta

manera emular los resultados obtenidos con el gluten, sin llegar a alcanzar su misma calidad. (Pedrosa Silva-Clerici, Airoidi, & El-Dash, 2009)

En los últimos años ha surgido una solución alternativa para este problema tecnológico, la extrusión de los cereales y harinas usadas en las formulaciones de productos sin gluten. El proceso de extrusión cambia las propiedades funcionales de las harinas usadas en las formulaciones de productos sin gluten, debido a cambios en la estructura del almidón y formación de nuevos enlaces entre proteínas. Esto mejora las propiedades reológicas de las masas y batidos en comparación con las formulaciones que incluyen gomas y/o enzimas, lo que las hace una opción prometedora en el desarrollo de productos libres de gluten. (Pedrosa Silva Clerici, Airoidi, & El-Dash, 2009; Sánchez, *et al.* 2008; Calderón de la Barca, *et al.* 2010) Además, estudios realizados por Mehlretter (1967) sugieren que el uso de ácidos orgánicos como el ácido láctico en mezclas de almidón junto con tratamiento térmico, mejoran la red tridimensional del almidón gelatinizado, presentando otra opción de mejora para los productos de panificación sin gluten. (Pedrosa Silva-Clerici, Airoidi, & El-Dash, 2009)

En base a lo expuesto es claro que la quinua por su buen perfil nutricional y la extrusión como proceso tecnológico que promete mejorar las características panificables de las harinas sin gluten junto con la acidificación, son opciones tecnológicas que aún necesitan ser estudiadas y evaluadas como potenciales soluciones para el desarrollo de productos libres de gluten.

## **2 Objetivos e hipótesis**

### 2.1 Objetivos

#### 2.1.1 Objetivo general

- Estudiar la utilización de ácido láctico y harina de quinua extrudida para la elaboración de pan sin gluten.

#### 2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar la combinación de humedad y temperatura de extrusión que den como resultado una harina precocida con las mejores características de panificación.
- Evaluar el efecto del uso de ácido láctico y harina de quinua extrudida en el volumen específico, perfil de textura y estructura de la miga de las muestras de pan obtenidas.

### 2.2 Hipótesis

- El uso de ácido láctico y las condiciones de extrusión de la quinua tienen un efecto significativo en las características físicas y de textura del pan sin gluten.
- El pan elaborado con harina de quinua extrudida y acidificado tiene características físicas y de textura mejores que las de un pan sin gluten a base de almidones no modificados.

### **3 Fundamentos Teóricos**

#### **3.1 Extrusión**

La extrusión es un proceso de transformación en el que un material es mezclado, fundido y forzado a fluir bajo ciertas condiciones de calentamiento y cizalla, a través de una boquilla que forma y/o seca por inflación los ingredientes, para obtener un producto de sección transversal constante y, en principio, longitud indefinida. (Guy, 2002; Beltrán & Marcilla, 2009)

La tecnología de extrusión se ha utilizado por muchos años en diferentes industrias, como la de plásticos, metales y cerámicas, por lo que la extrusión de alimentos no es nueva en la industria. Hoy en día, la extrusión es ampliamente usada en la industria alimenticia por su versatilidad, productividad, bajo costo y eficiencia energética. Además, se pueden fabricar productos de alta calidad con un mínimo impacto ambiental. Entre las aplicaciones de la extrusión en la industria alimenticia están la producción de cereales para el desayuno, alimentos infantiles, piensos para animales, productos de confitería, pasta precocida y análogos de carne. (Akdogan, 1999; Guy, 2002; Fellows, 1994; Guy, 2002)

En el proceso de extrusión, por lo general, los materiales se alimentan en forma sólida, y con la ayuda de la energía de cizalla ejercida por el tornillo rotatorio, y el calentamiento adicional del barril, el material a extrudir es calentado hasta su punto de fusión o plastificación. En este caso el extrusor actúa como una bomba, proporcionando la presión necesaria para hacer pasar al material, que ha cambiado sus características reológicas, a través de un dado o una serie de dados y sale del extrusor, a un ambiente de menor presión, expandiéndose hasta su forma final. Esto da como resultado un producto extrudido con propiedades físicas y químicas diferentes de los materiales crudos que se utilizaron. (Moscicki & van Zuilichem, 2011; Beltrán & Marcilla, 2009)

El proceso de extrusión puede ser controlado mediante la manipulación de una o más de las siguientes variables: temperatura en las diferentes zonas del extrusor, contenido de humedad de la materia prima, relación de compresión, velocidad del tornillo, caudal de alimentación, diseño del dado y tamaño de partícula, para así obtener diversos

productos con diferentes características físicas, químicas y sensoriales. (Chessari & Sellahewa, 2002)

Durante el proceso de extrusión, la mezcla de ingredientes pasa por una serie de transformaciones químicas y estructurales, como desnaturalización de proteínas, gelatinización de almidones, reacciones de degradación de vitaminas, pigmentos y formación de complejos amilosa-lípidos. El tratamiento térmico de los productos alimenticios dentro de un extrusor mejora la digestibilidad debido a la inactivación de enzimas, microorganismos y algunos factores antinutricionales presentes en los materiales crudos. (Kannadhasan & Muthukumarappan, 2010)

Los almidones y harinas pre-gelatinizadas, son productos que en presencia de agua fría son parcial o totalmente solubles y presentan las siguientes características: se dispersan más fácilmente y absorben más agua que sus contrapartes nativas, forman geles a temperatura ambiente y son menos propensos a sedimentarse. (Pedrosa Silva-Clerici M. T., 2012)

El uso de almidones pre-gelatinizados en productos alimenticios afecta sus características y cualidades, así como el volumen y la miga del pan, la elasticidad y suavidad de las pastas, la tolerancia al batido de mezclas de pasteles; textura, volumen, tiempo de vida en percha y estabilidad durante la descongelación de pan y pasteles; (Pedrosa Silva-Clerici M. T., 2012) haciéndolos ingredientes interesantes para la formulación de nuevos productos.

### 3.2 Quinua

La quinua es un pseudocereal cuyo cultivo es muy antiguo en el área andina (5000 años a.C.). Fue un componente importante en la dieta de las poblaciones andinas precolombinas; quienes reconocieron su alto valor nutricional y lo aprovecharon de modo integral, reemplazando en ocasiones completamente a las proteínas animales en la dieta (Repo-Carrasco, Espinoza, & Jacobsen, 2003; Koziol, 1992).

El consumo de quinua perdió fuerza con la conquista española, que marginó y reemplazó su cultivo con la introducción de cereales como la cebada y el trigo (Mujica, 1992; Jacobsen & Stolen, 1993), y pasó desapercibido por los pobladores urbanos de la región por razones, sobre todo, económicas y sociales.

Su redescubrimiento se dio a partir de la crisis económica de los países andinos, en la década de los 80, donde se establecieron modelos de desarrollo económico diferentes a los tradicionales, que contemplaron el desarrollo de sistemas de exportación a nuevos mercados en los países de Europa y Estados Unidos, en los que el mercado de consumo de alimentos se expandió hacia la búsqueda de alimentos nuevos. Esta situación hizo que la quinua pase de un cultivo de auto subsistencia a un producto con potencial nutricional, económico y de investigación (Risi, 1997).

La FAO considera a la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) como parte de los “Sistemas Importantes de Patrimonio de la Agricultura Mundial – SIPAM” y la Organización Mundial de la Salud como “grano futuro” fundamentalmente por la calidad de sus proteínas, fibra, minerales y vitaminas (Canahua, 2011).

De manera general, la quinua tiene 14,6% de proteína en base húmeda, que si bien no es un contenido excepcionalmente alto en comparación a otros granos, es de alta calidad, particularmente rica en histidina (3,2%) y lisina (6,1%) (Koziol, 1992; Repo-Carrasco, Espinoza, & Jacobsen, 2003). Así mismo, su coeficiente de eficiencia proteica está en el rango de 78–93% comparado con el de la caseína y cuando se cocina este aumenta al 102–105% (Koziol, 1992).

La composición proteica de la quinua es mayormente de albúminas y globulinas (44–77% del total de proteína); siendo la cheponina la principal proteína de la quinua (Ranhotra, *et al.* 1993), y en un menor porcentaje de prolaminas (0,5–7,0%), descartando así interacciones que puedan formar gluten (Koziol, 1992), haciendo a la quinua un grano apto para celíacos (Galwey, 1989).

El contenido de grasa de la quinua es de alrededor del 5,6% en base húmeda con un gran porcentaje de ácidos grasos insaturados (Koziol, 1992); con una fracción de ácido linoleico de 50,2%,  $\gamma$ -linolénico 4,8%, y ácido oleico 26% (Repo-Carrasco, Espinoza, & Jacobsen, 2003). Además la quinua tiene una concentración alta de tocoferoles (797,2 ppm de  $\gamma$ -tocoferol; 721,4 ppm  $\alpha$ -tocoferol), cuya actividad antioxidante le garantiza larga estabilidad en almacenamiento (Koziol, 1992; Repo-Carrasco, Espinoza, & Jacobsen, 2003).

Según Koziol (1992) el análisis proximal de tres variedades de quinua indica que el contenido de almidón de la quinua es de 60,4% en base húmeda con un porcentaje de

amilosa del 12,4%. Los gránulos de almidón de quinua son de estructura poligonal y tienen un diámetro que va desde 0,7–3,2  $\mu\text{m}$ , mucho más pequeño que los gránulos de otras fuentes amiláceas (Repo-Carrasco, Espinoza, & Jacobsen, 2003). El tamaño del gránulo es importante pues influencia directamente la calidad de las masas de panificación y pastificación (Koziol, 1992). La temperatura de gelatinización del almidón de quinua varía en un rango de 55,5–72 °C y presenta una excelente estabilidad a la congelación y retrogradación (Repo-Carrasco, Espinoza, & Jacobsen, 2003)

El contenido vitamínico de la quinua es alto en comparación con otros granos; 100 g de quinua en base seca contienen riboflavina (0,39 mg)  $\alpha$ -tocoferol (5,37 mg) y carotenos (0,39 mg); así mismo, aporta calcio (1487 mg), magnesio (2496 mg), hierro (132 mg), potasio (9267 mg), cobre (51 mg), manganeso (100 mg) y cloro (1533 mg) (Koziol, 1992).

Un componente importante dentro de la composición de la quinua y su mayor factor antinutricional es la saponina, la cual varía entre 0,1 y 5%. Se encuentra en el pericarpio, por lo que es fácilmente removida mediante lavado o abrasión (Repo-Carrasco, Espinoza, & Jacobsen, 2003). Las saponinas son las que imparten el sabor amargo característico de la quinua entera, considerándose a las variedades con contenidos de saponina menores a 0,11% en base húmeda como quinuas dulces, y superiores a 0,11% como amargas (Koziol, 1992).

### 3.3 Ácido láctico

El ácido láctico, es un ácido  $\text{C}_3$   $\alpha$ -hidroxicarboxílico natural, producto del metabolismo anaeróbico de los azúcares en virtualmente todos los seres vivos. Es un ácido orgánico muy versátil utilizado en las industrias química, farmacéutica, de alimentos y del plástico. Existen dos isómeros ópticos, el D(-) láctico y el L(+) láctico; y sólo la configuración L(+) es metabolizada por el organismo humano. Se encuentra en estado líquido, es higroscópico, de color variable entre incoloro a ligeramente amarillo, además es soluble en agua. Comercialmente está disponible en soluciones de 50 – 90%. Ambas formas isoméricas del ácido láctico pueden ser polimerizadas y se pueden producir polímeros con diferentes propiedades dependiendo de la composición. (Chahal & Starr, 2006)

El uso del ácido láctico en la industria de alimentos ha sido principalmente como acidulante, preservante y antimicrobiano. Sin embargo, Pedrosa Silva-Clerici (2009) postula que el uso de ácidos orgánicos aptos para el consumo humano en bajas concentraciones puede ser aplicado durante el proceso de horneado para fomentar la formación de una red tridimensional de almidón gelatinizado; esto en base a estudios de Mehlretter (1967) quien usó ácidos orgánicos para modificar almidón y demostró que algunos ácidos carboxílicos como el ácido fórmico, reaccionaron con el almidón a temperatura ambiente, mientras que otros como el ácido acético o el cítrico, requirieron de calentamiento para forzar la reacción.

El uso de almidones acidificados también es muy común en la elaboración de panes de yuca. Estudios demuestran que la modificación oxidativa con ácido láctico de almidón de yuca junto con exposición a radiación ultravioleta, dan como resultado cambios en las características de horneado de los almidones, mostrando un mayor incremento en el volumen específico alcanzado en los productos elaborados. (Mestres & Rouau, 1997; Plata-Oviedo & Camargo, 1998)

Este cambio se debe a que ambos factores causan una depolimerización oxidativa parcial del almidón creando fragmentos lineales, y disminuyendo la viscosidad de sus soluciones; facilitando así la formación de una estructura de matriz amorfa durante el horneado, y como consecuencia incrementan la expansión de los productos horneados. (Vatanasuchart, Naivikul, Charoenrein, & Sriroth, 2005) Además, esta reducción en el tamaño molecular del almidón, posiblemente fomenta un mayor colapso de los gránulos de almidón durante la gelatinización haciendo que se forme una mejor película alrededor de las burbujas de vapor generadas durante la expansión de las masas. (Alvarado, et al., 2013)

La presencia de ácidos tiene una fuerte influencia en las propiedades reológicas de las masas. Las masas acidificadas son más fluidas y menos densas en comparación a masas no acidificadas (Moore, Juga, Schober, & Arendt, 2007); también requieren un tiempo de batido ligeramente menor y tienen menor estabilidad que las masas con un nivel de pH normal (Hoseney, 1994). Otro cambio que se observa es que la adición de ácidos disminuye significativamente la temperatura de gelatinización de las harinas, y la dureza de los panes obtenidos. (Komlenić *et al.*, 2010)



## 4 Materiales y métodos

### 4.1 Ingredientes para la producción de pan sin gluten

Para la elaboración de los panes se utilizó harina de quinua extrudida, levadura fresca (Levapan, Ecuador), azúcar (Compañía Azucarera Valdez S.A., Ecuador), sal (ECUASAL, Ecuador), margarina (La Fabril, Ecuador), harina de arroz (Almanzur Foods, Ecuador), ácido láctico (Aditmaq, Ecuador) y harina sin gluten (Bob's Red Mill Natural Foods, EUA).

### 4.2 Producción de quinua pre-gelatinizada mediante extrusión

Para producir la quinua pre-gelatinizada se utilizó quinua orgánica entera (Sumak Life, Riobamba, Ecuador). El extrusor utilizado fue uno de laboratorio (Brabender Do-Corder DCE 330, C. W. Brabender Instruments, Duisburg, Alemania) con tres cámaras de calentamiento, de tornillo simple con un radio de compresión 1:1. Otros parámetros de procesamiento fueron, velocidad del tornillo 130 rpm, velocidad de alimentación  $2,7 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$  y un dado de 3 mm de diámetro en la matriz central. Los perfiles de temperatura usados fueron: 20, 30 y 60 °C; y 20, 30 y 95 °C, para la primera, segunda y tercera cámara respectivamente. Los porcentajes de humectación de las muestras a extrudir fueron de 18% y 25% de acuerdo al diseño experimental que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Diseño completamente al azar con arreglo factorial  $2^2$  para la elaboración de harina de quinua extrudida

Factores <sup>1</sup>	B. Porcentaje de humectación (%)	
A. Temperatura de extrusión (°C)	18	25
	<sup>2</sup> 60	a <sub>0</sub> b <sub>0</sub>
	<sup>3</sup> 95	a <sub>1</sub> b <sub>0</sub>

<sup>1</sup> Los niveles de los factores descritos fueron determinadas con pruebas preliminares

<sup>2</sup> Temperatura de la tercera cámara del extrusor correspondiente al perfil de temperatura 20, 30, 60 °C;

<sup>3</sup> Temperatura de la tercera cámara del extrusor correspondiente al perfil de temperatura 20, 30, 95 °C

### 4.3 Preparación de harina de quinua extrudida

Después de la extrusión termoplástica, los extrudidos se secaron por 2 horas usando un secador con circulación de aire a 50 °C. Esto permitió conseguir una humedad en los extrudidos menor al 10%. Luego del secado, las muestras fueron molidas utilizando un molino Alpine 160 UP2. Siguiendo el diseño experimental, las harinas se evaluaron mediante los índices de absorción de agua y de solubilidad en agua, tal como se muestra a continuación.

#### 4.3.1 Índice de absorción de agua

El índice de absorción de agua (IAA) es igual a la masa del gel obtenido por gramo de muestra seca de acuerdo al método descrito por Anderson *et al.* (1970). Se suspendió 1,17 g de muestra en 14 mL de agua a 30° C en un tubo de centrífuga de 15 mL de capacidad. La mezcla obtenida se agitó intermitentemente por un período de 30 minutos y se centrifugó a 3000 × g por 10 minutos. Se vertió el sobrenadante en una caja Petri previamente tarada. El gel remanente se pesó y se calculó el índice de absorción de agua a partir de su masa.

#### 4.3.2 Índice de solubilidad en agua

Se consideró el índice de solubilidad en agua a la cantidad de sólidos recuperados tras la evaporación del sobrenadante obtenido del análisis de absorción de agua, y se expresó como porcentaje de sólidos solubles en la muestra. (Anderson *et al.*, 1970)

### 4.4 Elaboración de los panes

De acuerdo al diseño experimental 2×4+1, se presentan las diferentes formulaciones en la tabla 2. La cantidad de agua que se utilizó en el control y en cada uno de los tratamientos fue variable y la necesaria para obtener una consistencia constante. Esta consistencia medida con un consistómetro Bostwick se expresa como el desplazamiento de 18 cm en 30 s de una solución al 40% de harina. El agua requerida se determinó en pruebas preliminares<sup>1</sup>. Los factores de estudio en la elaboración de los panes fueron el porcentaje de ácido láctico y el

---

<sup>1</sup> Los porcentajes de agua añadida fueron: 185% para harina 1, 130% para harina 2, 195% para harina 3, y 120% para harina 4.

tipo de harina extrudida empleada en cada tratamiento. El batido libre de gluten se preparó como se describe a continuación. Los ingredientes secos se mezclaron juntos, la levadura se disolvió en agua y se añadió a los ingredientes secos conjuntamente con el ácido láctico. La mezcla formada se batió en una batidora planetaria (KitchenAid KM25G0X, Estados Unidos) a velocidad 4 por dos minutos, y a velocidad 8 por un minuto. Seguidamente se vertieron los batidos (150 g) en moldes engrasados de panificación con dimensiones según norma INEN 530 (1980). Los moldes se colocaron en una cámara de fermentación a 35°C y 80% de humedad relativa por 60 minutos. Posteriormente los panes se colocaron en un horno de convección (Rational SelfCookingCenter<sup>®</sup>, Landsberg am Lech, Alemania) a 180 °C y 60% de humedad relativa por 40 minutos. Se enfriaron los panes a temperatura ambiente y se guardaron en bolsas de polietileno para su análisis posterior.

Tabla 2 Ingredientes para la elaboración de pan sin gluten

Ingredientes <sup>1</sup> (%harina)	Pan control	Pan de quinua extrudida
Harina de arroz	30	30
Harina libre de gluten	70	–
Harina de quinua extrudida <sup>2</sup>	–	70
Levadura	3	3
Sal	1	1
Margarina	2	2
Ácido láctico	–	0,2/1*

<sup>1</sup> (Sciarini, 2011)

<sup>2</sup> Para la elaboración de los panes se utilizó por separado para cada tratamiento las cuatro harinas obtenidas mediante extrusión

\* Los porcentajes variaron de acuerdo al tratamiento

Los análisis que se efectuaron a los panes obtenidos fueron volumen específico, perfil de textura y características de la miga.

#### 4.4.1 Volumen específico

El volumen específico se determinó mediante el método de desplazamiento de semillas, el cual es el cociente del volumen expresado en centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>) y la masa en gramos (g) según el modelo matemático volumen-masa. (Street, 1991; Weining, *et al.* 2008; Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1980)

#### 4.4.2 Perfil de textura

La textura de los panes fue determinada a partir del análisis de perfil de textura usando un texturómetro Brookfield CT3 Texture Analyzer (Brookfield Engineering Laboratories, Inc., MA, EUA), y el software TexturePro CT V1.2 Build 9. Para la determinación, se almacenaron los panes por un día a temperatura ambiente en bolsas de polietileno, y se rebanaron transversalmente con un cuchillo eléctrico. Las rebanadas (2,5 cm de espesor) se colocaron en el texturómetro individualmente y se determinó la textura de la miga de acuerdo a la técnica descrita por el fabricante con las siguientes especificaciones de calibración: compresión del 40%; sonda de diámetro 25,4 mm; carga de celda de 10000 g fuerza; carga de activación de 5,0 g fuerza; velocidad de ensayo 1,67 mm s<sup>-1</sup>; velocidad pre- y post-ensayo 2 mm s<sup>-1</sup>; tiempo de recuperación de 12 s; ciclos de 2 repeticiones y medición de la fuerza durante la compresión. Los parámetros analizados fueron dureza y elasticidad.

#### 4.4.3 Características de la miga

Las características de la miga se analizaron usando un sistema de análisis de imagen digital. Las imágenes se obtuvieron utilizando un scanner Epson L210 (Epson America, Inc., Long Beach CA, EUA). El análisis se efectuó en una sección de la imagen. La información se procesó usando el software ImageJ 1.48f (National Health Institute, EUA) y PeakFit v4 (Jandel Scientific, San Rafael, EUA), de acuerdo al método utilizado por Sciarini (2011). Las características estudiadas fueron: área media de las celdas y número de celdas por mm<sup>2</sup>.

#### 4.5 Métodos estadísticos

Para la elaboración de harina de quinua extrudida se aplicó un diseño completamente al azar con arreglo factorial de 2<sup>2</sup> para analizar la influencia de los factores (humedad y temperatura de extrusión) en las propiedades físicas de las harinas. En total se investigaron cuatro tratamientos con tres repeticiones cada uno. Los factores y sus niveles se describen en la tabla 1.

De igual forma para la elaboración de los panes sin gluten con harina de quinua se aplicó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2×4 y se analizó la influencia de la concentración de ácido láctico y el tipo de harina extrudida en las

características físicas y de textura de los panes. En este estudio se utilizó un control de pan sin gluten sin harina de quinua ni adición de ácido láctico. En total se investigaron ocho tratamientos más un control con tres repeticiones cada uno. Los factores y sus niveles se describen en la tabla 3.

Tabla 3 Diseño factorial con dos factores para la elaboración de pan sin gluten

Factores <sup>1</sup>	B. Porcentaje de ácido láctico (%)		
A. Tipo de harina extrudida		0,2	1,0
	1	a <sub>1</sub> b <sub>0</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>
	2	a <sub>2</sub> b <sub>0</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>
	3	a <sub>3</sub> b <sub>0</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>
	4	a <sub>4</sub> b <sub>0</sub>	a <sub>4</sub> b <sub>1</sub>

<sup>1</sup> Los niveles de los factores se probaron en pruebas preliminares siguiendo la propuesta de Komlenić *et. al* (2010)

Los resultados obtenidos se analizaron utilizando el software estadístico SPSS Statistics v.22. Para los diseños experimentales utilizados se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), y la prueba de separación de medias de Tukey.

## 5 Resultados y Discusión

### 5.1 Propiedades funcionales de las harinas extrudidas de quinua

La determinación y evaluación de las propiedades funcionales de las harinas es de suma importancia pues nos dan una referencia del comportamiento reológico que tendrán las masas o batidos y así poder escoger las técnicas adecuadas para la elaboración del pan. Además, los índices de absorción y solubilidad en agua son indicadores del grado de cocción del almidón y del efecto de la extrusión sobre el mismo. (Sciarini, 2011)

Tras la obtención de los cuatro tipos de harinas de quinua extrudida siguiendo el diseño experimental mencionado anteriormente, se analizaron los índices de absorción y solubilidad en agua de las mismas y se evaluaron los efectos de los tratamientos.

La tabla 4 muestra las medias cuadráticas de las variables de respuesta y se observa que sólo para el IAA existen diferencias significativas en los tratamientos, siendo la humedad el factor que influye significativamente en esta característica.

Tabla 4 Medias cuadráticas para las propiedades funcionales de las harinas extrudidas

	Grados de libertad	Medias cuadráticas	
		IAA	ISA
Total	11		
Tratamientos	2	1,4235832*	0,87536568 <sup>n.s.</sup>
Temperatura	1	0,0042326 <sup>n.s.</sup>	1,36581141 <sup>n.s.</sup>
Humedad	1	2,8319487*	0,02366199 <sup>n.s.</sup>
Temperatura × Humedad	1	0,0109852 <sup>n.s.</sup>	0,36125795 <sup>n.s.</sup>
Error Experimental	8	0,0149922	0,48660193

\* Valores de F significativos para  $P \leq 0,05$

<sup>n.s.</sup> No significativo ( $P \leq 0,05$ )

En el caso del ISA, los factores no tienen influencia significativa en las variaciones y los tratamientos no son significativamente diferentes.

### 5.1.1 Índice de absorción de agua

El IAA mide el volumen ocupado por el almidón después de haberse expandido en exceso de agua (Mason & Hosney , 1986), lo que corresponde al volumen del gel formado. En productos extrudidos es una medida de la cantidad de almidón y proteína desnaturalizada y la formación de nuevos complejos entre las macromoléculas (Dogan & Karwe, 2003). El IAA depende de la disponibilidad de grupos hidrofílicos y de la capacidad de formación de gel de las macromoléculas (Gómez & Aguilera, 1984).

En el presente estudio, se observa por el análisis de varianza que sólo el porcentaje de humedad empleado en la extrusión tuvo un efecto significativo en los valores de IAA. Existe una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de humedad y el IAA.

Los valores de IAA estuvieron en el rango de 3,92 y 2,89  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  (tabla 5). El valor más alto fue 3,92  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , que corresponde a la harina que se obtuvo tras la extrusión con un porcentaje de humedad de 18% y 60 °C, que es estadísticamente igual a la harina elaborada con una temperatura y humedad de extrusión de 95 °C y 18% respectivamente, cuyo valor fue 3,82  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ . El valor más bajo fue de 2,89  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , correspondiente al tratamiento procesado con humedad de 25% y 60 °C, y que es estadísticamente igual a la harina procesada con humedad de 25% y 95 °C.

Tabla 5 Valores medios de las propiedades funcionales de las harinas extrudidas (IAA)

Tratamiento	Niveles de los factores		IAA ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )
	Temperatura	Humedad	
1	-1	-1	3,92 <sup>a</sup>
2	1	-1	3,82 <sup>a</sup>
3	-1	1	2,89 <sup>b</sup>
4	1	1	2,91 <sup>b</sup>

Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $P \leq 0,05$ )

De acuerdo con Ding *et al.* (2006) y contrario a lo reportado por Silva, Carvahlo, & Andrade (2009), en este experimento se encontró que los valores de IAA disminuyen al incrementar la humedad de extrusión.

Esto debido a que a medida que el porcentaje de agua aumenta la energía transferida en el proceso de extrusión se invierte en calentar mayores cantidades de agua, en lugar de gelatinizar el almidón (Guhua , Ali , & Bhattacharya, 1997).

Además Dogan y Karwe (2003) indican que en materiales con alto contenido lipídico como la quinua, la grasa actúa como un segundo lubricante disminuyendo la fuerza de cizalla y evitando el desarrollo apropiado de la cocción durante la extrusión.

Por otro lado, a pesar de que el efecto de la temperatura no fue significativo en los IAA de las harinas, se sabe que sí es un factor importante y quizá con niveles de temperatura más altos las diferencias sean significativas.

Además, se evidenció que la modificación alcanzada con los diferentes tratamientos fue notable y esto se observó en el agua que se añadió para la elaboración de los panes, en los que para la formación del batido la cantidad de agua fue alta y difirió en los diversos tratamientos (120–195%) para alcanzar una misma consistencia.

Así mismo, los tiempo de fermentación (60 minutos) y horneado (40 minutos) empleados en la elaboración de los panes fueron relativamente más largos debido al alto contenido de agua en su formulación, comportamiento que también reporta Sciarini (2011) en su trabajo.

#### 5.1.2 Índice de solubilidad en agua

El índice de solubilidad en agua está relacionado a la cantidad de sólidos solubles, lo que es un indicativo del grado de dextrinización del extrudido. (Dogan & Karwe, 2003)

Pese a que los factores de estudio no fueron significativos para el ISA, se observa en la tabla 6 que los valores de sólidos solubles por gramo de harina fueron bajos, indicando que la energía empleada en la cocción promovió la gelatinización del almidón pero no fue suficiente para formar dextrinas.

Tabla 6 Medias de las propiedades funcionales de las harinas extrudidas (ISA)

Tratamiento	Niveles de los factores		ISA* (g·g <sup>-1</sup> )
	Temperatura	Humedad	
1	-1	-1	0,133
2	1	-1	0,130
3	-1	1	0,138
4	1	1	0,127

\* Medias de tres repeticiones



En el presente estudio, se desea que el ISA sea bajo con un alto IAA. Esto sugiere un incremento en el tamaño de los gránulos de almidón, lo que generará batidos de mayor viscosidad favoreciendo así la retención de gases de fermentación, y la obtención de panes con un mayor volumen específico.

## 5.2 Propiedades físicas de los panes

De acuerdo a la hipótesis propuesta en este estudio, las propiedades funcionales de las harinas y la adición de ácido láctico tienen una influencia directa en el comportamiento del batido durante la fermentación y el horneado, y estas a su vez repercuten en las propiedades físicas de los panes, como el volumen específico.

### 5.2.1 Volumen específico

El volumen del pan depende de múltiples factores, como la viscosidad de los batidos, la relación amilosa/amilopectina, la presencia de compuestos surfactantes, la agregación de proteínas durante el horneado (Álvarez-Jubet *et al.*, 2010), y en el caso de este estudio, la adición de ácido láctico.

En la tabla 7 se muestran las medias cuadráticas del análisis de varianza para volumen específico de los panes analizados. Se observa que solamente el ácido láctico tiene influencia significativa en la variación del volumen específico.

Tabla 7 Medias cuadráticas para volumen específico de los panes sin gluten

	Grados de libertad	Medias cuadráticas
		Volumen específico
Total	23	
Tratamientos	7	0,048*
Ácido Láctico	1	0,221*
Tipo de harina	3	0,027 <sup>n.s.</sup>
Ác. Láctico × Tipo de harina	3	0,010 <sup>n.s.</sup>
Error Experimental	16	0,014

\* Valores de F significativos para  $P \leq 0,05$

<sup>n.s.</sup> No significativo ( $P \leq 0,05$ )

Dado que el pan sin gluten es catalogado como un gel de estructura no covalente, (Pruska-Kedzior *et al.*, 2008) se presume que la adición de ácido láctico, como se mencionó anteriormente, disminuyó la temperatura de gelatinización de los almidones según lo mencionado por Komlenić, *et al.* (2010), haciendo que la

formación de una estructura de gel sea más rápida disminuyendo las pérdidas de gas y alcanzando un mayor volumen específico.

Así mismo se compararon los panes elaborados con la adición de ácido láctico con el control para determinar si existen diferencias y se encontró que sí existen diferencias significativas entre los grupos (tabla 8).

Tabla 8 Media cuadrática para volumen específico de los panes en estudio y el control

	Grados de libertad	Media cuadrática
		Volumen específico
Inter-grupos	2	0,215*
Intra-grupos	24	0,026
Total	26	

\* Valores de F significativos para  $P \leq 0,05$

Los panes con nivel de ácido láctico bajo (0,2%) y sin adición de ácido láctico (control) fueron los panes con mayor volumen específico con valores entre 1,74 y 1,91  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  (Tabla 9). Los resultados obtenidos cumplen con lo encontrado por Pedrosa Silva Clerici, Airoidi, & El-Dash, (2009) quienes indicaron que valores bajos de ácido láctico tienen influencia positiva en las propiedades físicas de los panes sin gluten.

Tabla 9 Valores medios de volumen específico de los panes sin gluten

Tratamiento	Niveles de los factores		Volumen específico ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )
	Ác. Láctico	Tipo de Harina	
1	-	1	1,773 <sup>a</sup>
3	-	2	1,741 <sup>a</sup>
5	-	3	1,905 <sup>a</sup>
7	-	4	1,744 <sup>a</sup>
2	+	1	1,693 <sup>b</sup>
4	+	2	1,557 <sup>b</sup>
6	+	3	1,633 <sup>b</sup>
8	+	4	1,512 <sup>b</sup>
Control	0	0	1,975 <sup>a</sup>

Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $P \leq 0,05$ )

Los resultados obtenidos muestran que la adición de ácido láctico en este experimento tuvo un efecto inversamente proporcional en la variable de volumen específico de los panes elaborados a partir de harina de quinua extrudida. Los

valores de la tabla 9 muestran que el control (sin ácido láctico) no es diferente de los panes con el mínimo porcentaje de ácido láctico (0,2%), por lo que se debe experimentar con niveles de ácido láctico dentro del rango de 0,2% y 1%.

Los valores obtenidos en el estudio (tabla 9) son similares a los obtenidos utilizando harinas de arroz acidificadas y extrudidas,  $1,63 - 2,25 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  (Pedrosa Silva-Clerici, Airoidi, & El-Dash, 2009), mucho menores a los valores alcanzados utilizando harinas de arroz extrudidas,  $3,30 - 4,33 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  (Sánchez *et al.*, 2008); y más altos que cuando se utilizó harina de quinua cruda sin acidificación,  $1,4 \pm 0,02 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  (Álvarez-Jubete, *et al.*, 2010), y  $1,51 \pm 0,07 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  (Hager, *et al.*, 2012). Lo que indica que en comparación con las harinas crudas y sin acidificar, el volumen específico de los panes elaborados a partir de harina de quinua extrudida y acidificados sí presentan una mejoría, y aunque no se encontró significancia estadística para el factor “tipo de harina” está muy claro que la modificación de las harinas por medio de la extrusión aumenta la consistencia de los batidos evitando que las partículas se sedimenten y el gas de fermentación se escape, manteniendo así un sistema homogéneo durante la fermentación y el horneado hasta alcanzar la gelatinización del almidón, aumentando así la capacidad de retención de gases y por ende el volumen específico de los panes. (Ozola, Straumite, & Klava, 2011; Houben, Höchstötter, & Becker, 2012; Sánchez, *et al.*, 2008; Álvarez-Jubete, *et al.*, 2010)

### 5.2.2 Perfil de textura

La textura puede ser considerada como una manifestación de las propiedades reológicas de un alimento y constituye un atributo de calidad importante ya que tiene gran influencia en la aceptabilidad del pan. (Pedrosa Silva-Clerici, Airoidi, & El-Dash, 2009) Para describir la textura de los panes estudiados se midieron los parámetros de dureza y elasticidad, ya que nos dan una aproximación de cómo se comportará el pan en la boca al ser mordido y masticado. (Pedrosa Silva-Clerici, Airoidi, & El-Dash, 2009) La tabla 10 muestra que de acuerdo con el análisis de varianza, sólo hay diferencias significativas entre los tratamientos para la variable de dureza, siendo el factor “tipo de harina” el que influye en dicha variabilidad.

Tabla 10 Medias cuadráticas para dureza y elasticidad de los panes sin gluten

	Grados de libertad	Medias cuadráticas	
		Dureza	Elasticidad
Total	23		
Tratamientos	7	4340064,09*	182,07 <sup>n.s.</sup>
Ácido Láctico	1	83426,04 <sup>n.s.</sup>	157,39 <sup>n.s.</sup>
Tipo de harina	3	9895081,15*	224,68 <sup>n.s.</sup>
Ác. Láctico × Tipo de harina	3	203926,37 <sup>n.s.</sup>	147,69 <sup>n.s.</sup>
Error Experimental	16	210194,83	145,17

\* Valores de F significativos para  $P \leq 0,05$

<sup>n.s.</sup> No significativo ( $P \leq 0,05$ )

### 5.2.2.1 Dureza

La dureza definida como la fuerza necesaria en el primer ciclo de compresión para generar deformación en el alimento durante el ensayo de textura; se refiere a la fuerza requerida para comprimir un alimento entre los molares o entre la lengua y el paladar. (Thibodeau, 2009) En la tabla 11 se muestran los resultados del análisis de varianza aplicado a las muestras de pan de quinua y al control como grupos separados.

Tabla 11 Media cuadrática para dureza de los panes en estudio y el control

	Grados de libertad	Media cuadrática
		Dureza
Inter-grupos	4	12832986,37*
Intra-grupos	22	1505314,14
Total	26	

\* Valores de F significativos para  $P \leq 0,05$

Se observa que existe una diferencia significativa entre los panes elaborados con harina de quinua extrudida y el control. La tabla 12 muestra los resultados de la separación de medias. Se observa que hay tres grupos de harinas para las cuales los resultados de dureza son significativamente diferentes.

Tabla 12 Valores medios de dureza para los panes sin gluten

Tratamiento	Niveles de los factores		Dureza (g)
	Ác. Láctico	Tipo de Harina	
1	-	1	1814 <sup>b</sup>
2	+	1	2164 <sup>b</sup>
3	-	2	2625 <sup>b</sup>
4	+	2	2396 <sup>b</sup>
5	-	3	1766 <sup>b</sup>
6	+	3	1707 <sup>b</sup>
7	-	4	4832 <sup>ab</sup>
8	+	4	4298 <sup>ab</sup>
Control	0	0	5549 <sup>a</sup>

Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $P \leq 0,05$ )

Con las harinas 1, 2, y 3 se obtuvieron panes más suaves que con la harina utilizada en el control, que comparados con valores de dureza para pan de trigo (864,72 g) (Hager, et al., 2012) son valores de dureza aceptables tomando en cuenta que la formulación utilizada en este estudio está libre de gluten y aditivos que ayuden al mejoramiento de la textura. Valores de dureza intermedios, se obtuvieron con la harina 4, la misma que estadísticamente comparte propiedades de los otros dos grupos de harinas. Esto indica claramente que el efecto de la cocción en las harinas de quinua afecta positivamente en la textura de los panes sin gluten pues grados de cocción mayores, proporcionan valores de dureza menores, logrando que el pan obtenido sea más suave, característica muy importante en panes con formulaciones libres de gluten en los que su elevada dureza es un problema tecnológico.

Además se ha comprobado que, de manera general, panes libres de gluten elaborados a base de harinas de pseudocereales presentan menor dureza que los panes elaborados con otro tipo de harina libre de gluten. (Álvarez-Jubete, Arendt, & Gallagher, 2009)

#### 5.2.2.2 Elasticidad

Siendo la elasticidad la altura que recupera un alimento durante el tiempo que recorre durante el primer y el segundo ciclo de compresión, la elasticidad mide cuanto de la estructura original del alimento se ha roto por la compresión inicial. (Thibodeau, 2009)

De acuerdo al análisis de varianza realizado entre las muestras de pan de harina de quinua y el control que se muestra en la tabla 12, no existe diferencia significativa entre los grupos de panes.

Tabla 13 Medias cuadráticas de elasticidad para los panes en estudio y el control

	Grados de libertad	Media cuadrática
		Elasticidad
Inter-grupos	1	18,038 <sup>n.s.</sup>
Intra-grupos	25	144,265
Total	26	

<sup>n.s.</sup> No significativo ( $P \leq 0,05$ )

No sólo los factores no influyen en los valores de elasticidad de los panes elaborados con las harinas extrudidas, sino que además estos no son diferentes del control.

Cabe recalcar que la baja elasticidad alcanzada en los panes puede ser en parte por la gran cantidad de agua que se tuvo que añadir para formar los batidos. Una mayor humedad en los panes favorece la formación de una estructura de miga más densa, con paredes más gruesa y por lo tanto menos elásticas. (Ozola, Straumite, & Klava, 2011)

### 5.2.3 Características de la miga

La elección del pan por parte de los consumidores está influenciada en parte por la estructura de la miga; así, en el pan de trigo convencional, se prefiere una estructura fina y homogénea; sin embargo, los panes libres de gluten en general poseen paredes celulares muy gruesas y una estructura densa e irregular, por la dificultad para incorporar y retener gases durante el batido y la fermentación, causado por la ausencia de una red viscoelástica. (Sciarini, 2011) En el estudio se encontró (tabla 15) que no existen diferencias estadísticas significativas para ninguna de las variables de respuesta entre las muestras de pan analizadas.

Tabla 14 Medias cuadráticas para características de la miga

	Grados de libertad	Medias cuadráticas	
		Número de celda	Tamaño de celda
Total	23		
Tratamientos	7	0,744 <sup>n.s.</sup>	0,989 <sup>n.s.</sup>
Ácido Láctico	1	1,125 <sup>n.s.</sup>	0,977 <sup>n.s.</sup>
Tipo de harina	3	0,439 <sup>n.s.</sup>	0,971 <sup>n.s.</sup>
Ác. Láctico × Tipo de harina	3	0,923 <sup>n.s.</sup>	1,012 <sup>n.s.</sup>
Error Experimental	16	0,372	0,985

n.s. No significativo ( $P \leq 0,05$ )

### 5.2.3.1 Número de celdas

El número de celdas es un parámetro que nos permite analizar la calidad de la miga. Para comprobar si existen diferencias entre las muestras de pan de quinua y el control, se realizó un análisis de varianza y se encontró (tabla 16) que en efecto, el control es diferente de los demás panes sin gluten.

Tabla 15 Media cuadrática para número de celdas – comparación con el control

	Grados de libertad	Media cuadrática
		Número de celdas
Inter-grupos	1	13,474*
Intra-grupos	25	1,288
Total	26	

\* Valores de F significativos para  $P \leq 0,05$

Los resultados del análisis de separación de medias en la tabla 17 muestran que el control tiene más número de celdas por unidad de área que el resto de panes, esto a su vez significa que el tamaño de sus celdas es menor.

Tabla 16 Valores medios de número de celda de los panes sin gluten

Tratamiento	Niveles de los factores		Número de celdas (Celdas·mm <sup>-2</sup> )
	Ác. Láctico	Tipo de Harina	
1	-	1	1,45 <sup>b</sup>
2	+	1	2,91 <sup>b</sup>
3	-	2	1,87 <sup>b</sup>
4	+	2	1,41 <sup>b</sup>
5	-	3	1,75 <sup>b</sup>
6	+	3	2,09 <sup>b</sup>
7	-	4	1,41 <sup>b</sup>
8	+	4	1,79 <sup>b</sup>
Control	0	0	4,08 <sup>a</sup>

Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $P \leq 0,05$ )

Para evaluar completamente la calidad de la miga, es necesario relacionar el número de celdas con el tamaño de las mismas; así, se busca que las celdas sean numerosas, que estén distribuidas uniformemente en todo el pan y que dichas celdas sean de tamaños similares. En la figura 1 se observa las celdas de los panes en estudio.



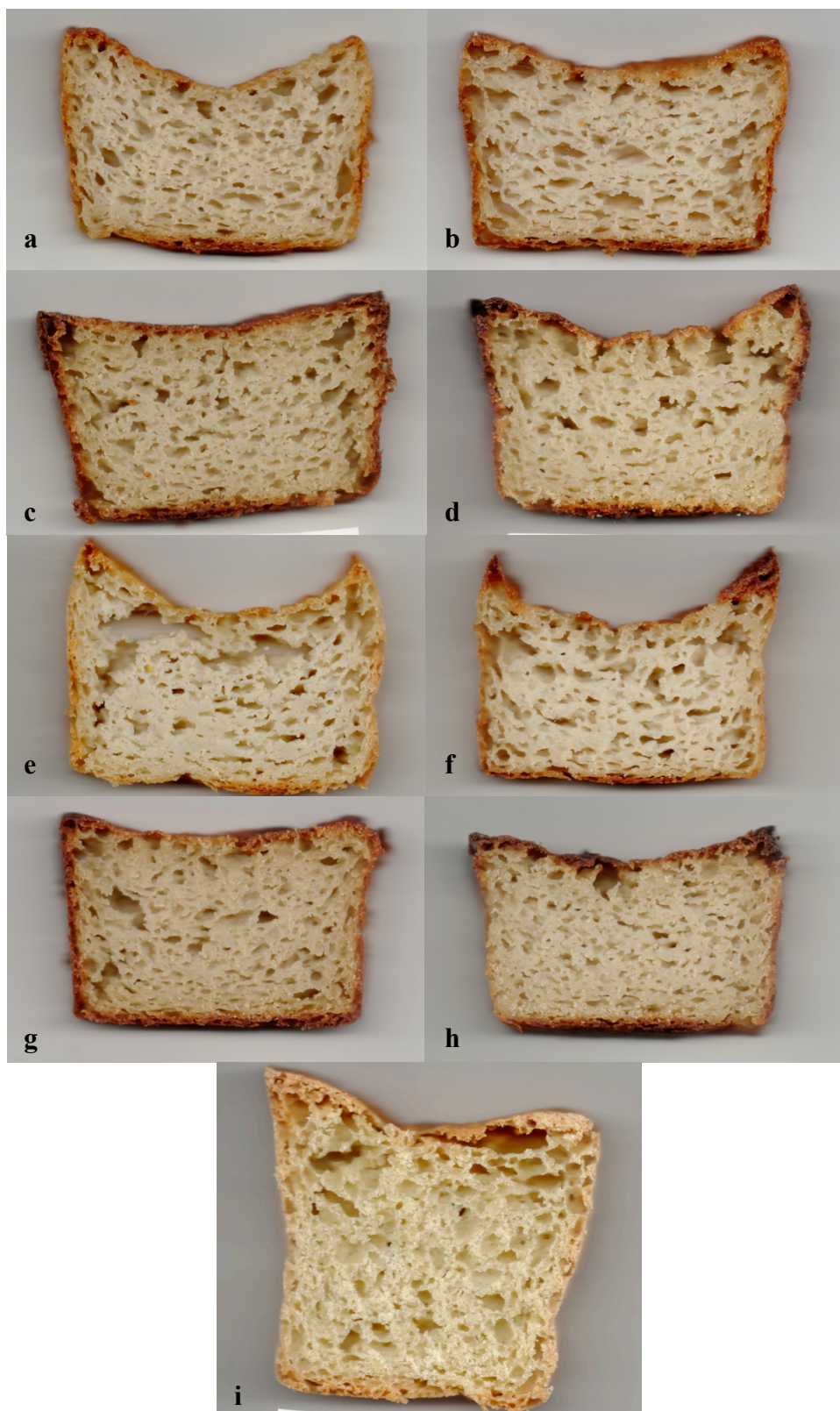


Fig. 1 Fotografías de los panes obtenidos para cada tratamiento

**a)** Harina 1 – Ác.Lac. 0,2% **b)** Harina 1 – Ác.Lac. 1% **c)** Harina 2 – Ác.Lac. 0,2% **d)** Harina 2 – Ác.Lac. 1% **e)** Harina 3 – Ác.Lac. 0,2% **f)** Harina 3 – Ác.Lac. 1% **g)** Harina 4 – Ác.Lac. 0,2% **h)** Harina 4 – Ác.Lac. 1% **i)** control

### 5.2.3.2 Tamaño de celdas

En cuanto al tamaño de celdas, el análisis estadístico (tabla 18) no muestra diferencias significativas entre los panes de harina de quinua y el control.

Tabla 17 Media cuadrática para tamaño de celda – comparación con el control

	Grados de libertad	Media cuadrática
		Tamaño de celda
Inter-grupos	1	0,151 <sup>n.s.</sup>
Intra-grupos	25	0,908
Total	26	

<sup>n.s.</sup> No significativo ( $P \leq 0,05$ )

Se observa en la figura 1 que de manera general las celdas son de tamaño homogéneo y están uniformemente distribuidas en la matriz del pan.

### 5.3 Elección del mejor tratamiento

Para elegir el tratamiento con los niveles de factores que produzcan el mejor pan, se realizó una tabla de ponderación asignando a las variables analizadas un nivel de importancia del 1 a 5, siendo 1 poco importante y 5 muy importante.

La tabla 18 muestra la calificación obtenida para cada tratamiento.

Tabla 18 Tabla de ponderación para seleccionar el o los mejores tratamientos

Tratamiento	Volumen específico (5)	Dureza (4)	Elasticidad (1)	Tamaño medio de celda (2)	Número de celdas (3)	Total
1	5	4	1	2	3	14
2	0	4	1	2	3	9
3	5	4	1	2	3	14
4	0	4	1	2	3	9
5	5	4	1	2	3	14
6	0	4	1	2	3	9
7	5	0	1	2	3	11
8	0	0	1	2	3	6

Como se puede observar los mejores tratamientos son los 1, 3, y 5. Dichos tratamientos fueron elaborados con un porcentaje de ácido láctico bajo (0,2%) y las harinas extrudidas 1, 2, y 3; de las cuales las harinas 1 y 3 corresponden a los tratamientos con mayor índice de absorción de agua y la harina 2 al tratamiento con el menor índice de absorción de agua; resultados que se corresponden con lo encontrado al analizar las variables individualmente.

## **6 Conclusiones y recomendaciones**

Con base en los resultados obtenidos del estudio se concluye que el volumen específico alcanzado en los diferentes tratamientos fue bajo; siendo únicamente la variación del porcentaje de ácido láctico el factor que influye significativamente en esta variable. Es así que, los panes de los tratamientos con ácido láctico al 0,2% son los que desarrollan mayor volumen específico, igualando el volumen alcanzado por el control.

En cuanto a la textura de los panes, aquellos elaborados con harinas de mayor cocción son los que menor dureza presentan y son significativamente diferentes del control que presenta una dureza mucho mayor. Por otro lado, los factores no tienen efecto en la variable de elasticidad. Todos los tratamientos son estadísticamente idénticos entre sí y con el control.

El análisis de varianza para la estructura de la miga indica que los factores de estudio no influyen en las variaciones observadas entre los tratamientos. En el caso de la variable de número de celdas por unidad de área, el control sí es diferente de los demás tratamientos .

Analizando los resultados se puede decir que el pan con mejores características se logra con una combinación de harinas con altos grados de cocción y niveles de ácido láctico bajo. Así, la harina con mejores propiedades de panificación se obtiene al extrudir la quinua con humedades bajas, para que la cocción sea más efectiva.

Finalmente se concluye que los panes obtenidos a partir de harinas de quinua extrudida y con adición de ácido láctico presentan una mejoría en comparación con el control que se elaboró con una mezcla comercial de harinas crudas libres de gluten. Siendo de manera general el porcentaje de ácido láctico el que tiene un mayor efecto en la calidad global del pan, y en su mayoría, harinas con mayor índice de absorción de agua producen un pan con mejores características.

Sin embargo, se necesita investigar más ampliamente los factores de estudio, con un diseño experimental que permita probar más niveles dentro de los factores y

evaluar más variables de respuesta que esclarezcan de qué manera influyen los factores en la variación de los parámetros analizados.

Así también el estudio se beneficiaría al investigar más factores en la elaboración del pan, como tiempos de batido, temperaturas y tiempo de horneado, formulaciones con diferentes aditivos, diferentes consistencias de los batidos, tiempos de fermentación, diferentes porcentajes de harina de quinua extrudida, acidificación biológica versus química, entre otros que afectan la calidad del pan obtenido.

## 7 Bibliografía citada

Álvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2009). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Science and Nutrition* , 60 (S4), 240-257.

Álvarez-Jubete, L., Auty, M., Arendt, E., & Eimear, G. (2010). Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten-free bread formulations. *European Food Research and Technology* , 230, 437-445.

Ahlborn, G., Pike, O., Hendrix, S., Hess, W., & Huber, C. (2005). Sensory, mechanical, and microscopic evaluation of stalin in low-protein and gluten free breads. *Cereal Chemistry* , 82, 328-335.

Akdogan, H. (1999). High moisture food extrusion. *International Journal of Food Science and Technology* , 34, 195-207.

Alvarado, P., Grosmaire, L., Dufour , D., Toro, A., Sánchez, T., Calle , F., et al. (2013). Combined effect of fermentation, sun-drying and genotype on breadmaking ability of sour cassava starch. *Carbohydrate Polymers* .

Anderson, R., Conway, H., & Peplinski, A. (1970). Gelatinization of Corn Grits by Roll Cooking, Extrusión Cooking and Steaming. *Stärke* , 4 (22), 130-135.

Angioloni, A., & Collar, C. (2009). Bread crumb quality assessment: a plural physical approach. *European Food Research and Technology* , 229, 21-30.

Beltrán, M., & Marcilla, A. (3 de Julio de 2009). *Universidad de Alicante*. Retrieved 24 de Septiembre de 2012 from Tecnología de polímeros - Extrusión: <http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

Bold, J., & Rostami, K. (2011). Gluten tolerance; potential challenges in treatment strategies. *Gastroenterology and Hepatology From Bed to Bench* , 4 (2), 53-57.

Calderón de la Barca, A. M., Rojas-Martínez, M. E., Islas-Rubio, A. R., & Cabrera-Chávez, F. (2010). Gluten-Free Breads and Cookies of Raw and Popped Amaranth Flours with Attractive Technological and Nutritional Qualities. *Plants Foods for Human Nutrition* , 65, 241-246.

- Canahua, A. (2011). 2012 "AÑO INTERNACIONAL DE LA QUINUA". (Spanish). *Agro Enfoque* , 24 (175), 84.
- Celiacos del Ecuador. (2012). *Celiacos del Ecuador - La enfermedad*. Retrieved 14 de Octubre de 2011 from Celiacos del Ecuador: <http://celiacosdelecuador.webnode.com/la-enfermedad/>
- Chahal, S., & Starr, J. (2006). Lactic Acid. In B. Elvers (Ed.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (p. 219). Weinheim: Wiley-VCH.
- Chessari, C., & Sellahewa, J. (2002). Control efectivo del proceso. In R. Guy (Ed.), *Extrusión de los alimentos*. Zaragoza: Editorial Acribia S.A.
- Daitch, L., & Epperson, J. N. (2011). Celiac Disease. A Storm of Gluten Intolerance. *Clinician Reviews* , 21 (4), 49-55.
- Ding, Q., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G., & Marson, H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering* , 73 (2), 142-148.
- Dogan, H., & Karwe, M. (2003). Physicochemical properties of quinoa extrudates. *Food Science and Technology International* , 9 (2), 101-104.
- Fellows, P. (1994). *Tecnología del procesado de los alimentos: Principios y prácticas*. Zaragoza: Editorial Acibia S.A.
- Galwey, N. (1989). Quinoa. *Biologist* , 36, 267-274.
- Guhua , M., Ali , Z., & Bhattacharya, S. (1997). Twin-screw extrusion of rice flour without a die: Effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics . *Journal of Food Engineering* , 32 (3), 251-267.
- Gómez, M., & Aguilera, J. (1984). A physicochemical model for extrusion of starch. *Journal of Food Science* , 49 (1), 40-43.
- Guy, R. (2002). Materias primas para la cocción por extrusión. In R. Guy (Ed.), *Extrusión de los alimentos*. Zaragoza: Editorial Acribia S.A.

Hager, A.-S., Wolker, A., Czerny, M., Bez, J., Zannini, E., Arendt, E., et al. (2012). Investigation of product quality, sensory profile and ultrastructure of breads made from a range of commercial gluten-free flours compared to their wheat counterparts. *European Food Research and Technology*, 235, 333-344.

Hoseney, R. (1994). *Principles of Cereal Science and Technology*. St. Paul, MN, USA: American Association of Cereal Chemist, Inc.

Houben, A., Höchstötter, A., & Becker, T. (2012). Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: an overview. *European Food Research and Technology*, 235, 195-208.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1980). Harina de trigo - Ensayo de panificación. *INEN 530*.

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (Diciembre de 1980). Harina de trigo. Ensayo de panificación. *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 530*.

Jacobsen, S., & Stolen, O. (1993). Quinoa - Morphology, phenology and prospects for its production as a new crop in Europe. *European Journal of Agronomy*, 2 (1), 19-29.

Kannadhasan, S., & Muthukumarappan, K. (2010). Effect of Starch Sources on Properties of Extrudates Containing DDGS. *International Journal of Food Properties*, 13 (5), 1012-1034.

Komlenić, D., Ugarčić-Hardi, Z., Jukić, M., Planinić, M., Bucić-Kojić, A., & Strelec, I. (2010). Wheat dough rheology and bread quality effected by *Lactobacillus brevis* prefermented, dry sourdough and lactic acid addition. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1417-1425.

Koziol, M. J. (1992). Chemical Composition and Nutritional Evaluation of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 5, 35-68.

Mason, W., & Hoseney, R. (1986). Factors affecting the viscosity of extrusion-cooked wheat starch. *Cereal Chemistry*, 63 (5), 436-441.

Mehlretter, C. L. (1967). Production and use of dialdehyde starch. In R. L. Whistler, & E. F. Paschall (Eds.), *Starch, chemistry and technology* (Vol. II). Nueva York: Academic Press.

Mestres, E., & Rouau, X. (1997). Influence of natural fermentation and drying conditions on the physiochemical characteristics of cassava starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture* , 147-155.

Moore, M., Juga, B., Schober, T., & Arendt, E. (2007). Effect of Lactic Acid Bacteria on Properties of Gluten-Free Sourdoughs, Batters, and Quality and Ultrastructure of Gluten-Free Bread. *Cereal Chemistry* , 84 (4), 357-364.

Moscicki, L., & van Zuilichem, D. (2011). *Extrusion-Cooking and Related Technique*. Weinheim: Wiley-VCH.

Mowat, A. M. (2003). Coeliac disease - a meeting point for genetics, immunology, and protein chemistry. *The Lancet* , 361, 1290-1292.

Mujica, A. (1992). Granos y leguminosas. In J. Hernández, J. Bermejo, & J. León (Eds.), *Cultivos Marginados: otra perspectiva de 1942* (pp. 129-146). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO.

Ozola, L., Straumite, E., & Klava, D. (2011). Extruded maize flour effect in the quality of gluten-free bread. *6th Baltic Conference on Food Science and Technology "Innovations for Food Science and Production" "FOODBALT-2011"* , (pp. 131-136). Jelgava.

Pedrosa Silva-Clerici, M. T. (2012). Physical and/or Chemical Modifications of Starch by Thermoplastic Extrusion. In A. El-Sonbati (Ed.), *Thermoplastic Elastomers* (pp. 39-56). Rijeka: InTech.

Pedrosa Silva-Clerici, M. T., Airoidi, C., & El-Dash, A. A. (2009). Production of acidic extruded rice flour and its influence on the qualities of gluten-free bread. *Food Science and Technology* , 42, 618-623.

Plata-Oviedo, M., & Camargo, c. (1998). Effect of acid treatments and drying processes on physico-chemical and functional properties of cassava starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture* , 77, 103-108.



Pruska-Kędzior, A., Kędzior, Z., Gorący, M., Pietrowska, K., Przybylska, A., & Spsychalska, K. (2008). Comparison of rheological, fermentative and baking properties of gluten-free dough formulations. *European Food Research and Technology*, 227, 1523-1536.

Repo-Carrasco, R., Espinoza, C., & Jacobsen, E. (2003). Nutritional Value and Use of the Andean Crops Quinoa (*Chenopodium quinoa*) and Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food Reviews International*, 19 (1-2), 179-189.

Risi, J. (1997). La quinua: actualidad y perspectivas. In I. I. IICA, & C. d. Exportadores, *Taller sobre desarrollo sostenible de la quinua*. La Paz, Bolivia.

Rostami Nejad, M., Hogg-Kollars, S., Ishaq, S., & Rostami, K. (2011). Subclinical celiac disease and gluten sensitivity. *Gastroenterology and Hepatology From Bed to Bench*, 4 (3), 102-108.

Sánchez, H., González, R., Osella, C., Torres, R., & de la Torre, M. (2008). Elaboración de pan sin gluten con harinas de arroz extrudidas. *Ciencia y tecnología alimentaria*, 6 (2), 109-116.

Sciarini, L. S. (2011). *Estudio del efecto de diferentes aditivos sobre la calidad y la conservación de panes libres de gluten*. Universidad Nacional de la Plata, Departamento de Ciencias Biológicas. Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata.

Silva, M. C., Carvahlo, C., & Andrade, C. (2009). The effects of water and sucrose contents on the physicochemical properties of non-directly expanded rice flour extrudates. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 29 (3), 661-666.

Street, C. (1991). *Flour confectionary manufacture*. Glasgow: Blackie and son Ltd.

Thibodeau, L. (14 de Diciembre de 2009). *It's all about bread*. Retrieved 11 de Marzo de 2014 from Brookfield Engineering: <http://www.brookfieldengineering.com/download/files/12.09-Its-All-About-Bread.pdf>

Vatanasuchart, N., Naivikul, O., Charoenrein, S., & Sriroth, K. (2005). Molecular properties of cassava starch modified with different UV irradiations to enhance baking expansion. *Carbohydrate Polymers* , 61, 80-87.

Weining, H., Yangsoo, K., Xianyu, L., & Rayas-Duarte, P. (2008). Rheofermentometer parameters and bread specific volume of frozen sweet dough influenced by ingredients and dough mixing temperatures. *Journal of Cereal Science* , 48, 639-646.