



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería Agrícola - Programa de Magister en Ingeniería Agrícola

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y
NUTRICIONALES DE INSUFLADOS DE QUINUA (*Chenopodium
quinoa* Willd.), ROJA INIA**

Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Agrícola con
mención en Agroindustrias

Franklyn Elard Zapana Yucra
CHILLÁN-CHILE
2019

Profesor Guía: Johannes de Bruijn
Dpto. de Agroindustrias, Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y NUTRICIONALES DE INSUFLADOS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) ROJA INIA

Aprobada por:

Johannes de Bruijn
Ingeniero en Alimentos, Dr.

Profesor Guía

Leslie Vidal Jiménez
Profesor de Estado en Química, Dr.

Evaluadora Interna

Pedro Melín Marín
Ingeniero Agrónomo, M. Sc.

Evaluador Interno

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.



Evaluadora Interna

Pamela Williams Salinas
Ingeniero Agrónomo, Dr.

Evaluadora Externa

Rodrigo Bórquez Yáñez
Ingeniero Civil Químico, Dr.

Evaluador Externo

Pedro Aqueveque Muñoz
Profesor de Biología, Dr.

Director del Programa

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Johannes de Bruijn por haber aceptado dirigir esta tesis, por su paciencia y disponibilidad en todo momento a resolver múltiples consultas, que surgían durante el desarrollo de la misma.

Al Dr. Pedro Aqueveque, director del programa de magister, por su constante apoyo y preocupación todo el transcurso del magister.

A los miembros de la comisión evaluadora, Dra. Leslie Vidal, Dra. María Eugenia Gonzales, M. Sc. Pedro Melín, Dra. Pamela Williams y Dr. Rodrigo Bórquez. Por sus recomendaciones en el proceso de la tesis.

A los profesores Gustavo Cabrera, Cristina Loyola, Janicia Venegas, Marcelo Muñoz, Rudi Radrigán, Sixto Rojas Juan Cañumir y José Manuel Prieto. Por su apoyo durante la ejecución de tesis.

A la Escuela de Postgrado de la Universidad de Concepción, por la Beca de estudios de Postgrado “Becas Especiales Agroindustria) para obtener el grado de magister.

Al proyecto (PYT-2017-0495) “Polo Territorial de Desarrollo de Ingredientes Funcionales y Aditivos, a partir de Granos Ancestrales, para la Industria Alimentaria Mundial” financiado por la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) por el financiamiento de la tesis. A Carlos Avilés Gerente Polo Territorial de Desarrollo de Granos Ancestrales en Orafti Chile S.A, Marcela Verdugo ingeniera de proyecto y Mario Aranda, por el apoyo en los análisis de las muestras.

A mi familia por el incondicional apoyo en todo este proceso lejos de casa.

A todos compañeros y compañeras, quienes son su atención, palabras de aliento me hicieron sentir en casa, gracias por todo el cariño y apoyo.

Gracias a todos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Índice de tablas	vi
Índice de figuras	vii
Resumen	viii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Hipótesis	3
1.3 Estructura de la tesis	3
1.4 Bibliografía	4
Capítulo 2. Desarrollo del proceso de insuflado de quinua	7
2.1 Introducción	7
2.2 Materiales y métodos	9
2.2.1 Materia prima	9
2.2.2 Recubrimiento	9
2.2.3 Alveometría	11
2.2.4 Tratamientos térmicos de granos	11
2.2.5 Diseño estadístico	13
2.3 Resultados y discusión	13
2.3.1 Selección del tipo de recubrimiento	13
2.3.2 Condiciones de procesos térmicos	14
2.3.3 Consumo de energía	17
2.4 Conclusión.....	18
2.5 Bibliografía.....	18
Capítulo 3. Caracterización de las propiedades físicas, químicas, y nutricionales de insuflados de quinua	23
3.1 Introducción	23
3.2 Materiales y métodos	25
3.2.1 Materia prima	25
3.2.2 Propiedades físicas de la quinua	25
3.2.3 Forma	25
3.2.4 Tamaño	26
3.2.5 Densidad	26
3.2.6 Color	27
3.2.7 Índice de expansión	27
3.2.8 Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad de agua (ISA)	27
3.2.9 Microscopía electrónica de barrido	28
3.2.10 Propiedades mecánicas	28
3.2.11 Propiedades térmicas	29
3.2.12 Propiedades químico nutricionales	29
3.2.13 Digestibilidad <i>in vitro</i> de materia seca, orgánica y proteína	29
3.2.14 Diseño experimental y análisis estadístico	30
3.3 Resultados y discusión	30
3.3.1 Forma y tamaño	30
3.3.2 Densidad	32
3.3.3 Color	34
3.3.4 Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad de agua (ISA)	35
3.3.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	36

3.3.6	Propiedades mecánicas	37
3.3.7	Propiedades térmicas	38
3.3.8	Análisis proximal	41
3.3.9	Digestibilidad <i>in vitro</i> de materia seca, orgánica y proteína	42
3.4.	Conclusión	43
3.5.	Bibliografía	43
Capítulo 4.	Conclusiones	50
Apéndice	51



Índice de tablas

	Página
Tabla 2.1	Parámetros de alveometría de granos de quinua tratados mediante microondas con y sin recubrimiento 13
Tabla 2.2	Índice de expansión y energía mecánica específica (EME) en muestras sin recubrimiento 18
Tabla 2.3	Índice de expansión y energía mecánica específica (EME) en muestras con recubrimiento (CR)..... 18
Tabla 3.1	Tamaño de granos de quinua (cruda) e insuflados sin recubrimiento 32
Tabla 3.2	Tamaño de granos de quinua (cruda) e insuflados con recubrimiento 32
Tabla 3.3	Densidades y porosidad de insuflados de quinua sin recubrimiento 33
Tabla 3.4	Densidades y porosidad de insuflados de quinua con recubrimiento 33
Tabla 3.5	Color de insuflados de quinua sin recubrimiento producidos mediante tres tratamientos térmicos 34
Tabla 3.6	Color de insuflados de quinua con recubrimiento producidos mediante tres tratamientos térmicos 34
Tabla 3.7	Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) en muestras insufladas de quinua sin recubrimiento 35
Tabla 3.8	Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) en muestras insufladas de quinua con recubrimiento 35
Tabla 3.9	Características de textura de materia prima y de insuflados sin recubrimiento 37
Tabla 3.10	Características de textura de materia prima y de insuflados con recubrimiento 37
Tabla 3.11	Resultados de TG/DTG, DSC de quinua (materia cruda) e insuflados de quinua sin recubrimiento 39
Tabla 3.12	Resultados de TG/DTG, DSC de quinua (materia cruda) e insuflados de quinua con recubrimiento 40
Tabla 3.13	Valor nutricional (g/100 g ms) de insuflados de quinua sin recubrimiento. 41
Tabla 3.14	Valor nutricional (g/100 g materia seca) de insuflados de quinua con recubrimiento 41
Tabla 3.15	Digestibilidad <i>in vitro</i> de insuflados de quinua sin recubrimiento 42
Tabla 3.16	Digestibilidad <i>in vitro</i> de insuflados de quinua con recubrimiento 42
Apéndice 1	Características alveográficas de las muestras de harina de trigo y harina de quinua 51
Apéndice 3	Forma de los granos crudos e insuflados de quinua 51

Índice de figuras

	Página
Figura 2.1 <i>Chenopodium quinoa</i> : Sección longitudinal del grano. Pericarpio (PE); endospermo (EN); cotiledón (C); meristema apical (SA); eje de hipocotilo radicular (H); radícula (R), funículo (F); perisperma (P) (Prego et al., 1998)	7
Figura 2.2 Inflado de quinua con recubrimiento N° 2 mediante horno microondas a diferentes potencias.....	14
Figura 2.3 Expansión de granos de quinua con y sin recubrimiento a 20 % de humedad (bh) tratados mediante cañón expansor en función de la presión de operación	15
Figura 2.4 Expansión de granos de quinua con y sin recubrimiento tratados mediante extrusor de tornillo simple en función de la humedad	16
Figura 2.5 Expansión de granos de quinua con y sin recubrimiento tratados mediante horno de microondas en función de la potencia	17
Figura 3.1 Mediciones de microfotografías de granos de quinua: (A) materia prima, (B) cañón expansor, (C) extrusor y (D) microondas	25
Figura 3.2 Microfotografías de granos de quinua: (A) materia prima, (B) cañón expansor, (C) extrusor y (D) microondas	31
Figura 3.3 Microestructura de insuflados de quinua, Roja INIA, con y sin recubrimiento, procesadas mediante tres tratamientos térmicos	36
Figura 3.4 TG y DTG de materia prima e insuflados de quinua sin recubrimiento	38
Figura 3.5 TG y DTG de materia prima e insuflados de quinua con recubrimiento	38
Figura 3.6 DSC de materia prima e insuflados de quinua sin recubrimiento	39
Figura 3.7 DSC de materia prima e insuflados de quinua con recubrimiento	39
Apéndice 2 Microfotografías de granos de quinua	51
Apéndice 4 Curvas de distribución del tamaño de gránulos y cavidades de materia prima e insuflados de granos de quinua	52

Resumen

La demanda de productos derivados de quinua se ha incrementado por su valor nutricional equilibrado en aminoácidos esenciales para el consumo humano. El mayor desafío tecnológico para la quinua es su transformación en un alimento saludable e instantáneo. El objetivo de esta investigación es desarrollar y caracterizar insuflados de granos de quinua (Roja INIA) producidos mediante cañón expansor, extrusor de tornillo simple y horno de microondas, evaluando tres formulaciones de recubrimiento (quitosano, almidón de yuca, almidón de maíz, gelatina y sorbitol) mediante alveometría. Se estudiaron distintas condiciones de proceso (presión, potencia y contenido de humedad) y consumo de energía. Los insuflados se caracterizaron mediante sus propiedades físicas (forma, tamaño, densidad, color, índice de expansión, índice de absorción de agua, índice de solubilidad de agua, microestructura, propiedades mecánicas y térmicas), químicas (análisis proximal) y nutricionales (digestibilidad *in vitro* de materia orgánica y proteína). Las condiciones óptimas de proceso fueron las siguientes: presión de 1,31 MPa por 780 s para el cañón expansor, potencia de 1200 W por 60 s para horno de microondas, velocidad giratoria de 500 rpm para extrusor de tornillo simple y contenido de humedad de 18 - 20% bh. El recubrimiento con quitosano, almidón de maíz y sorbitol permitió generar una masa con buenas características de tenacidad (P) y extensibilidad (L) presentando una razón de P/L que varía entre 0,16 y 0,17 m m⁻¹. El consumo de energía para el insuflado de quinua mediante el cañón expansor fue 9,27 kJ kg⁻¹, mediante el extrusor 489 kJ kg⁻¹ y con el horno de microondas 1200 kJ kg⁻¹. Los insuflados de quinua presentaron formas de prolato esferoide con tamaños que oscilaron entre 1,6 y 4,8 mm, una densidad aparente entre 107 y 600 kg m⁻³, índice de expansión 1,41 a 2,13 m m⁻¹, intensidad de color de 13,7 a 21,5, tono 42,4 a 69,1, índice de absorción de agua 3,45 a 5,27 kg kg⁻¹, índice de solubilidad de agua 7,0 a 40,4%, el tamaño de las cavidades (microestructura) 51 a 1100 μm, dureza de 0,43 a 5,64 N mm, la degradación del almidón fue entre 119 a 323 °C, entalpías de 53 a 134 J g⁻¹ respectivamente. Los procesos térmicos realizados a través del cañón expansor y extrusor alcanzaron insuflados de buena calidad de quinua recubierta, evitaron la pérdida de las propiedades nutricionales y presentaron una alta digestibilidad *in vitro* de materia orgánica (84 - 88%) y proteína (79 - 90%). Estos resultados pueden ser de mucha utilidad para optimizar procesos y desarrollar nuevas formulaciones de alimentos instantáneos en la industria alimentaria y futuras investigaciones.

1. Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa* W.) perteneciente a la familia de Chenopodiaceae, es originaria de los Andes de Sudamérica y se ha cultivado en la región andina durante miles de años (Taylor & Parker, 2002). Presenta una amplia diversidad genética y gran adaptabilidad a diversas condiciones agroecológicas, puede crecer desde el nivel del mar hasta 4000 m sobre el nivel del mar, a humedades que oscilan entre 40 y 88%, y temperaturas de -4 a 38 °C (Bojanic, 2011).

Es apreciado por su alto valor nutricional equilibrada (Mota et al., 2016). El almidón representa el 48-69% MS en grano de quinua (Wang & Zhu, 2016). Se ha informado que el contenido de proteínas se encuentra entre 14 a 18% (Abugoch, 2009). Se ha estimado el contenido de lípidos en el rango de 4,4-8,8%, por encima del nivel promedio de los cereales (Wang & Zhu, 2016). Los lípidos en la quinua se componen de 55,6% de lípidos neutros, 25,4% de lípidos polares y 18,9% de ácidos grasos libres (Przybylski et al., 1994). Además, la quinua presenta una importante fuente de fibra dietética (7-10%) (Abugoch, 2009), enriquecida con ciertos tipos de micronutrientes tales como minerales (potasio), vitaminas (piridoxina o vitamina B6; ácido fólico o vitamina B9), así como compuestos bioactivos beneficiosos para la salud, como polifenoles y antioxidantes (Tang et al., 2016).

La quinua es un cultivo estratégico para proporcionar una nutrición humana de calidad frente al cambio climático, por lo tanto está en proceso de rápida expansión fuera del cultivo agronómico tradicional (Ruiz et al., 2014; Wang & Zhu, 2016). Es una tendencia mundial que los países con problemas de mala alimentación conducen tanto a la desnutrición como al sobrepeso infantil. Se estima que el número de personas con desnutrición crónica en el mundo han alcanzado los 515 millones en 2017, frente a los 777 millones en 2015, inferior los 900 millones el 2000 (Kline et al., 2017). Según FAO y OPS (2017), Chile está dentro de los países con mayores tasas de sobrepeso infantil con un 9,3%, superando el promedio de 7% para la población de menores de 5 años en América Latina y el Caribe. En la población adulta para las mujeres es de 32,8% y en hombres 24,8%. En consecuencia, existen elevadas probabilidades que se desarrollen enfermedades no transmisibles, como cardiovasculares, diabetes, hipertensión y cáncer que son las principales causas de muerte en la región. Por otro lado, la quinua posee efectos positivos para la salud metabólica, cardiovascular y gastrointestinal en humanos (Navruz-Varli & Sanlier, 2016). Asimismo, puede beneficiar a personas con intolerancia a la lactosa, mujeres propensas a osteoporosis, personas con anemia, diabetes, dislipidemia, obesidad y celíacos (Vega-Gálvez et al., 2010). Por tanto, no contiene gluten y puede ser una alternativa para personas con enfermedades celíacas (Alvarez-Jubete et al., 2010). Otro estudio reveló que el consumo diario de quinua por personas entre 18 y 45 años durante 30 días redujo considerablemente sus triglicéridos, colesterol total y niveles de lipoproteína de baja densidad (LDL) (Farinazzi-Machado et al., 2012). Además, Yao et al. (2014), afirman que el consumo de la quinua fomenta el potencial antioxidante e inmunoregulador.

Actualmente la quinua se cultiva en más de 70 países; los principales productores son Perú y Bolivia, que concentran el 90% de la producción. Ecuador, Estados Unidos y Canadá tienen cerca del 10% restante de la producción mundial. Chile ocupa el lugar 26 de acuerdo al volumen exportado (INIA, 2015). Sin embargo, estos países exportan la materia prima sin ningún valor agregado o transformación.

La quinua tiene un rol importante en el desarrollo y la diversificación de productos alimentarios. Por lo tanto, el desarrollo de nuevos alimentos a base de este grano, presenta múltiples beneficios para la salud el cual podría ofrecer una excelente oportunidad para mejorar la salud pública, dado que, estos alimentos están siendo muy bien evaluados por los consumidores, fabricantes de alimentos y la comunidad científica (Gul et al., 2016). Se predice que la relevancia de las proteínas de origen vegetal en la nutrición humana aumentará en el futuro, por ejemplo, en forma de sustitutos de carne y lácteos (Day, 2013). Sin embargo, todavía es bastante limitada la brecha de investigación respecto a la composición nutricional y falta de nuevas tecnologías para su procesamiento.

El principal componente de los granos de quinua es el almidón, que varía de 30 a 70% de la materia seca como parámetro importante en el proceso de inflado de cereales (Li & Zhu, 2018). Además, el conocimiento de las propiedades físicas y del comportamiento de proteínas vegetales durante su procesamiento es fundamental para el desarrollo de productos valiosos mediante inflado (Aiking, 2011).

Los procesos termodinámicos en general implican cambios físicos y químicos en la materia prima. El procesamiento a alta temperatura y tiempo corto (HTST) es generalmente considerado como el método más efectivo en términos de retención de nutrientes (Saalia & Phillips, 2011). Así en esta investigación se plantean estudiar tres tratamientos térmicos para generar insuflados de granos de quinua (extrusión, expansión mediante cañón y microondas). Entre las tecnologías de procesamiento de alimentos existentes, la extrusión se considera en la industria alimentaria como una de las tecnologías más versátiles para procesamiento, produciendo una amplia gama de productos extruidos de diferentes tamaños, formas, textura y sabor agradables para los consumidores (Kaur et al., 2014). Presenta diversas ventajas, como flexibilidad, bajo costo, calidad de producto y un mínimo de residuos (Camire et al., 1990). Un método que reduce los efectos de factores anti-nutricionales sin modificar el nivel de proteína en productos alimenticios, a modo que aumenta la solubilidad de fibra dietética y la digestibilidad de proteína y almidón, y disminuye solo la oxidación de lípidos (Nikmaram et al., 2015; Soetan & Oyewole, 2009).

La operación de inflado de los cereales mediante cañón de expansión consiste en la aplicación repentina de calor a presión atmosférica para que el agua se vaporice dentro del grano, alcanzando luego presiones internas muy altas (Song & Eckhoff, 1994). En esta etapa, el tejido externo se rompe y el grano se expande, formando una estructura espumosa de endospermo unido a fragmentos de pericarpio y embrión (Hoseney et al., 1983). En el método de inflado con cañón expansor, muestras de cereales alimentan un tambor giratorio después del tratamiento hidrotermal, la salida del tambor se cierra y luego se calienta, se genera vapor sobrecalentado dentro de los granos debido al calentamiento, que puede subir hasta 115 °C, y la presión dentro del tambor puede llegar a 8 bar. Luego, al llegar a una presión de aproximadamente 13 bar, la tapa del cilindro se abre y la presión se libera instantáneamente, causando el inflado de los granos (Hoke et al., 2005). La operación de inflado mediante cañón de expansión se caracteriza por un consumo excesivo de energía e higiene generalmente deficiente.

Hoy en día, hay una creciente tendencia a utilizar hornos de microondas (MW) para el procesamiento de alimentos, debido a una mayor eficiencia de calentamiento respecto a procesos tradicionales, incluyendo un tiempo más breve de arranque, calentamiento más rápido, mayor

eficiencia energética, ahorro de espacio, calentamiento selectivo, y productos finales con alimentos mejorados en calidad (Maisont & Narkrugsa, 2009; Sumnu, 2001). Estos factores hacen que el calentamiento por microondas sea teóricamente una opción ideal para generar insuflados de granos de quinua. A modo de ejemplo, la aplicación de un horno de microondas para el inflado de cereales permitió fijar el porcentaje máximo de inflado en un 63,47% para un contenido de humedad de 14% y un consumo de energía de 80 kJ (1000 W y 80 s) (Swarnakar et al., 2014).

La nueva tendencia en la alimentación humana es consumir alimentos saludables y sostenibles que involucren la agricultura, nutrición y salud, donde la quinua insuflada como un snack listo para consumo para usar en refrigerios o en el desarrollo de nuevos productos. Sin embargo, no hay investigaciones minuciosas que determinan la calidad del grano insuflado antes y después del proceso. Por lo tanto, en este estudio se plantea desarrollar insuflados de quinua usando tres metodologías (expansión, microondas y extrusión), evaluar en consumo de energía y determinar sus propiedades de calidad.

1.1 OBJETIVOS

En este estudio se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Estudiar las propiedades físicas, químicas y nutricionales de quinua insuflada mediante cañón expansor, horno de microondas y extrusor, y su incidencia en la calidad del producto final.

Objetivos específicos:

- Desarrollar una película de recubrimiento para insuflados de granos de quinua por horno de microondas, cañón expansor y extrusor.
- Evaluar el consumo energético del horno de microondas, cañón expansor y extrusor.
- Analizar las propiedades físicas (tamaño, forma, densidad, color, índice de absorción de agua, índice de solubilidad de agua, microestructura, módulo de elasticidad, dureza, fuerza máxima y propiedades térmicas) de quinua insuflada
- Analizar las propiedades químicas (humedad, ceniza, grasa, proteína, y carbohidratos) de quinua insuflada.
- Evaluar la digestibilidad *in vitro* de materia orgánica y proteína de quinua insuflada.

1.2 Hipótesis

A través del tratamiento térmico por un horno de microondas es posible lograr la mayor expansión de quinua, con la menor pérdida de propiedades nutricionales y menor consumo energético en comparación con los tratamientos por extrusor y cañón expansor.

1.3 Estructura de la tesis

La tesis se encuentra organizada en capítulos cuyo contenido se describe a continuación.

El capítulo 1 de la tesis aborda la importancia de la quinua, el problema principal de la investigación, sus objetivos e hipótesis de investigación.

El capítulo 2 presenta las condiciones de los procesos de inflado de quinua mediante tres tratamientos térmicos.

En el capítulo 3 se presenta la caracterización física, química y nutricional de insuflados de quinua.

El capítulo 4 presenta las principales conclusiones de la tesis, aportes y recomendaciones para futuros trabajos de investigación en la misma línea temática propuesta en la tesis.

1.4 Bibliografía

Abugoch James, L. E. (2009). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, chemistry, nutritional and functional properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 58, 1–31.

Aiking, H. (2011). Future protein supply. *Trends in Food Science and Technology*, 22(2-3), 112–120.

Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science and Technology*, 21(2), 106–113.

Bojanic, A. (2011). Quinoa : An ancient crop to contribute to world food security. In *FAO* (Vol. 37th Confe, p. 54). Regional Office for Latin American and the Caribbean.

Camire, M. E., Camire, A., & Krumhar, K. (1990). Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 29(1), 35–57.

Day, L. (2013). Proteins from land plants - Potential resources for human nutrition and food security. *Trends in Food Science and Technology*, 32(1), 25–42.

Farinazzi-Machado, F. M. V., Barbalho, S. M., Oshiiwa, M., Goulart, R., & Pessan Junior, O. (2012). Use of cereal bars with quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) to reduce risk factors related to cardiovascular diseases. *Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas*, 32(2), 239–244.

Gul, K., Singh, A. K., & Jabeen, R. (2016). Nutraceuticals and functional foods: The foods for the future world. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(16), 2617–2627.

Hoke, K., Houšová, J., & Houška, M. (2005). Optimum conditions of rice puffing. *Czech Journal of Food Sciences*, 23(1), 1–11.

Hoseney, R. C., Zeleznak, K., & Abdelrahman, A. (1983). Mechanism of popcorn popping. *Journal of Cereal Science*, 1(1), 43–52.

INIA. (2015). Quínoa: Un súper alimento para Chile y el mundo. *Tierra Adentro*, 108, 1-84.

Kaur, G. J., Rehal, J., Singh, A. K., Singh, B., & Kaur, A. (2014). Optimization of extrusion parameters for development of ready-to-eat breakfast cereal using RSM. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 33(2), 77-86.

Kline, K. L., Msangi, S., Dale, V. H., Woods, J., Souza, G. M., Osseweijer, P., Muger, H. K. (2017). Reconciling food security and bioenergy: priorities for action. *GCB Bioenergy*, 9(3), 557–576.

Li, G., & Zhu, F. (2018). Quinoa starch: Structures, properties, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 181(1), 851–861.

- Maisont, S., & Narkrugsa, W. (2009). Effects of some physicochemical properties of paddy rice varieties on puffing qualities by microwave "original." *Kasetsart Journal - Natural Science*, 43(3), 566–575.
- Mota, C., Santos, M., Mauro, R., Samman, N., Matos, A. S., Torres, D., & Castanheira, I. (2016). Protein content and amino acids profile of pseudocereals. *Food Chemistry*, 193, 55–61.
- Navruz-Varli, S., & Sanlier, N. (2016). Nutritional and health benefits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Cereal Science*, 69, 371–376.
- Nikmaram, N., Garavand, F., Elhamirad, A., Beiraghi-Toosi, S., & Goli-Movahhed, G. (2015). Production of high quality expanded corn extrudates containing sesame seed using response surface methodology. *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*, 7(5), 713–720.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), & la Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2017). *Panorama de la Seguridad Alimentaria y Nutricional en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile.
- Przybylski, R., Chauhan, G. S., & Eskin, N. A. M. (1994). Characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa*) lipids. *Food Chemistry*, 51(2), 187–192.
- Ruiz, K. B., Biondi, S., Osés, R., Acuña-Rodríguez, I. S., Antognoni, F., Martínez-Mosqueira, E. A., ... Molina-Montenegro, M. A. (2014). Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 349–359.
- Saalia, F. K., & Phillips, R. D. (2011). Degradation of aflatoxins by extrusion cooking: Effects on nutritional quality of extrudates. *LWT - Food Science and Technology*, 44(6), 1496–1501.
- Soetan, K. O., & Oyewole, O. E. (2009). The need for adequate processing to reduce the anti-nutritional factors in plants used as human foods and animal feeds: A review. *African Journal of Food Science*, 3(9), 223–232.
- Song, A., & Eckhoff, S. R. (1994). Optimum popping moisture content for popcorn kernels of different sizes. *Cereal Chemistry*, 71(5), 458–460.
- Sumnu, G. (2001). A review on microwave baking of foods. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(2), 117–127.
- Swarnakar, A. K., Devi, M. K., & Das, S. K. (2014). Popping characteristics of paddy using microwave energy and optimization of process parameters. *International Journal of Food Studies*, 3(1), 45–59.
- Taylor J. R. N., & Parker, M. L. (2002). *Quinoa*, In: *Pseudocereals and less common cereals. Grain properties and utilization potential*. (P. S. Belton & J. R. N. Taylor, Eds.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Tang, Y., Zhang, B., Li, X., Chen, P. X., Zhang, H., Liu, R., & Tsao, R. (2016). Bound phenolics of quinoa seeds released by acid, alkaline, and enzymatic treatments and their antioxidant and α -glucosidase and pancreatic lipase inhibitory effects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(8), 1712–1719.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain : a review. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 90(15), 2541–2547.

- Yao, Y., Shi, Z., & Ren, G. (2014). Antioxidant and immunoregulatory activity of polysaccharides from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *International Journal of Molecular Sciences*, *15*(10), 19307–19318.
- Wang, S., & Zhu, F. (2016). Formulation and quality attributes of quinoa food products. *Food and Bioprocess Technology*, *9*(1), 49–68.



Capítulo 2. Desarrollo del proceso de inflado de quinua

2.1 Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un pseudocereal de origen andino que fue cultivado por antiguas civilizaciones como los Aztecas, los Mayas y los Incas hace más de 5000 años (Wang & Zhu, 2016). Su favorable adaptabilidad edafológica y climática ha permitido ampliar este cultivo a diferentes zonas geográficas, como Europa, América del Norte, Asia y África (Abderrahim et al., 2015; Filho et al., 2017). Es un cultivo anual cuyas panojas tienen en promedio una altura de entre 1,0 y 2,0 m con una llamativa flor de diferentes colores según la variedad, y producen semillas cilíndricas, lisas con un largo de 1,0 mm y un diámetro de 2,5 mm (NTP, 2009). Los granos contienen saponinas que se encuentran en el pericarpio (Figura 2.1) y son responsables del sabor amargo. La saponina generalmente se elimina antes de su uso (Reguera & Haros, 2017; Ruales & Nair, 1994). El principal componente de los insuflados es el almidón que se encuentra en el perisperma y varía entre 30 y 70% en base a la materia seca (Li & Zhu, 2018).

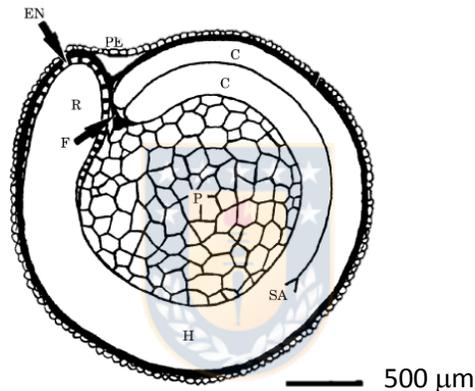


Figura 2.1. *Chenopodium quinoa*: Sección longitudinal del grano. Pericarpio (PE); endospermo (EN); cotiledón (C); meristema apical (SA); eje de hipocotilo radicular (H); radícula (R); funículo (F); perisperma (P) (Prego et al., 1998).

Esta especie se ha utilizado para diferentes propósitos, fabricación industrial de almidón, proteínas y saponinas, pastas y cereales para el desayuno y galletas para personas alérgicas al gluten y para pacientes diabéticos debido a su bajo índice glucémico (Vega-Gálvez et al., 2010). El procesamiento de granos de quinua y su transformación en productos como insuflados o snacks con un elevado valor nutritivo para los consumidores representa una nueva oportunidad para industrializar los granos de quinua a gran escala. A continuación, se comentan algunos estudios publicados sobre insuflados de cereales y de quinua en particular, utilizando cañón expansor, extrusor y horno de microondas.

El proceso de inflado por cañón expansor es un proceso conocido y ampliamente utilizado para fabricar snacks, que consta de la liberación repentina de vapor sobrecalentado acumulado; el cambio de la presión da como resultado la expansión de la matriz y la formación de una estructura porosa (Hui & Ozgul Evranuz, 2016). Yana Quispe (2015), analizó insuflados de tres variedades de quinua utilizando un cañón expansor, obteniendo la mejor expansión para la variedad Pasankalla con un 94,5% de volumen de expansión a 1,1 MPa de presión, la variedad Kancolla tuvo 93,5% a 1,1

MPa y la variedad Ayara un 81,0% a 0,96 MPa. Hoke et al. (2007) determinaron los parámetros de temperatura, presión y temperatura, para insuflados de cebada pelada, obteniendo un producto de calidad a 550°C, con una presión de 0,9 a 1,0 MPa y una humedad de 16,5%. El contenido de humedad de los insuflados de arroz y avena está en los intervalos de 5-8% base seca (bs) y 6-10% bs, respectivamente. La humedad disminuyó con el aumento de la presión junto con una disminución de la densidad aparente (Lee et al., 2019).

La extrusión es una tecnología versátil que se utiliza para producir diversos alimentos basados en cereales como bocadillos expandidos y alimentos para bebés (De Cindio et al., 2002). Sin embargo, durante este proceso se alteran las propiedades fisicoquímicas del grano (Ramos Díaz et al., 2015). El proceso implica someter la materia prima a energía mecánica, presión y calor a medida que pasa a través de un solo tornillo, o un conjunto de tornillos, encerrado en un barril, y finalmente forzando el alimento a través de un dado donde tiene lugar la conformación del producto final (Ganjyal & Hanna, 2002). Existen varios estudios sobre el procesamiento por extrusión de cereales, solos o en combinación, como el maíz (Chinnaswamy & Hanna, 1988), trigo (Kowalski et al., 2015), y arroz (Hagenimana et al., 2006) para producir snacks listos para consumo o como cereales para el desayuno, pero existen pocos estudios reportados con quinua. Kowalski et al. (2016), determinaron las características del procesamiento por extrusión de quinua (var. Cherry Vanilla), donde la energía requerida fue de 250 a 500 kJ kg⁻¹, la relación de expansión de 1,17 a 1,55 g cm⁻³, la densidad real de 0,45 a 1,02 g cm⁻³, el índice de absorción de agua de 2,33 a 3,05 g g⁻¹, y el índice de solubilidad de agua fue de 14,5 a 15,9 %. Concluyeron que la harina de quinua presenta una expansión relativamente baja en comparación con el maíz o el trigo.

El horno de microondas ha ganado popularidad en el procesamiento de los alimentos, debido a su capacidad de calentamiento, la reducción del tiempo de cocción, la distribución de calor relativamente uniforme, su manejo seguro, su facilidad de operación y su bajo mantenimiento (Salazar-González et al., 2012; Zhang et al., 2006). El proceso de inflado de los granos por microondas consiste en la aplicación repentina de calor a presión atmosférica para que el agua se vaporice dentro del grano, alcanzando presiones internas muy altas (Song & Eckhoff, 1994). En esta etapa, el tejido externo se rompe y el grano se expande, formando una estructura espumosa del endospermo unido a fragmentos de pericarpio y embrión (Hoseney et al., 1983).

Los parámetros relevantes para el procesamiento por microondas son el nivel de potencia, densidad de la potencia y tiempo de residencia que deciden en la calidad del insuflado de los cereales (Joshi et al., 2014; Sharma et al., 2014). Swarnakar et al. (2014), estudiaron el estallido de arroz usando un horno de microondas. El porcentaje máximo de inflado fue del 63,47% para un contenido de humedad de 14% con un consumo de energía de 80 kJ. El insuflado de productos almidonados en horno de microondas ha resultado difícil en comparación con los pellets expandidos en aceite de freír, incluso las palomitas de maíz expandidas en microondas. Estos productos encuentran problemas como un inflado desigual, quema y ausencia de una señal audible. La falta de una barrera contra la humedad, como el pericarpio, conduce a una pérdida de humedad antes y después de la expansión (Van der Sman, 2016). Para ello se plantea aplicar una capa de recubrimiento a los granos de quinua y mejorar así la calidad del insuflado por el horno de microondas, cañón expansor y extrusor.

El parámetro de calidad más importante de los productos insuflados es el volumen de expansión, que está influenciado por las características de la composición del grano crudo (Chen & Yeh, 2001) y las condiciones de procesamiento (Chandrasekhar & Chattopadhyay, 1990). Por otro lado, el proceso de inflado es afectado por el tamaño del grano, el espesor del pericarpio, la temperatura, la presión, la actividad de agua y el contenido de agua (este último debe estar entre 14 y 16%) (Gökmen, 2004). Las modificaciones físicas, estructurales y químicas ocurren durante el proceso de inflado de los granos que se someten a deshidratación, gelatinización de almidón, aumento de volumen y cambio de la textura (Hoke et al., 2007). Los insuflados son generalmente obtenidos de arroz, trigo, maíz, avena y cebada, mayoritariamente de granos enteros (Hoke et al., 2007). Así, los insuflados son particularmente nutritivos y saludables porque el exterior de las capas de los granos (aleurona y pericarpio) son ricos en antioxidantes, fibras, proteínas (Hidalgo & Brandolini, 2008), y minerales (Erba et al., 2011).

En la literatura antes mencionada, existe en general una falta de información sobre las condiciones del grano antes del proceso de inflado y consumo de energía. Este capítulo tiene por objetivo, de generar una película de recubrimiento para los granos de quinua, definir las condiciones para el inflado de los granos de quinua mediante horno de microondas, cañón expansor y extrusor, y calcular el consumo energético de los procesos térmicos.

2.2 Materiales y métodos

El trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad, Laboratorio de Propiedades Físicas de Biomateriales, Laboratorio de Cereales y Planta Piloto del Departamento de Agroindustrias de la Facultad de Ingeniería Agrícola, además en el Laboratorio de Nutrición Animal del Departamento de Producción Animal de la Facultad de Agronomía y la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT) de la Universidad de Concepción, entre los meses de marzo a diciembre del año 2018.

2.2.1 Materia prima

La quinua (ecotipo Roja INIA), se cultivó entre octubre de 2017 y marzo de 2018, en la Región de Ñuble (Selva Negra) (36°50'55,25''S; 72°8'25,31''O), en suelos fertilizados con K, 200 kg ha⁻¹; P, 100 kg ha⁻¹; N 100 kg ha⁻¹; B, 2 kg ha⁻¹ y Zn 1,8 kg ha⁻¹. Después de la cosecha los granos fueron limpiados de impurezas (hojas, perigóneos, fragmentos de tallos, semillas extrañas y otras), mediante una cribadora Clipper (Vac-A-Way, Model 758, USA). Se desaponificó por vía húmeda (Bertuzzi Food Processing Srl, Italy) (Bergesse et al., 2015), se efectuó el secado en horno convectivo (Binder GmbH, Tuttingen, Germany) a 70 °C hasta una humedad de 15 % bh. Por último, se almacenó en bolsas herméticas (ziploc) a una temperatura de 20 ± 2 °C, para su posterior procesamiento y análisis.

2.2.2 Recubrimiento

Se realizaron tres métodos de preparación de recubrimientos.

1. Primero se preparó una película de recubrimiento para los granos de quinua compuesta de almidón de yuca, quitosano y glicerol como plastificante siguiendo el procedimiento de Bangyekan et al. (2006), con algunas modificaciones. Se agitó una mezcla de almidón de yuca (6%w/v), glicerol (2%w/v) y agua en un vaso precipitado (1 L) con un agitador Heavy Duty Laboratory Stirrer (G.K. Heller Corp., USA) a 333 r.p.m.; luego, se calentó la mezcla en una placa

calefactora Barnstead Thermolyne, Super Nuova a 70°C hasta obtener una solución viscosa, transparente. Después de homogeneizar por 10 minutos, se agregaron 250 g de quinua y 200 mL de la solución viscosa a un vaso precipitado de 1 L y se agitó ligeramente para humedecer todos los granos. Se separaron los granos humedecidos de la solución viscosa mediante un colador plástico, secando finalmente los granos a temperatura ambiente durante la noche.

Durante la siguiente etapa, se disolvió quitosano (4%w/v) en ácido acético (2%v/v), utilizando un agitador magnético Barnstead Thermolyne, Super Nuova durante 2 a 3 h a 500 r.p.m. hasta completar el proceso de disolución. Primero se calentó la solución de ácido acético (2%v/v) (160 mL) hasta 80°C y se agregó lentamente quitosano, en agitación constante. Se aforó con ácido acético (2%v/v) hasta 200 mL. Se agregaron 250 g de granos de quinua, recubiertos con almidón de yuca, y 200 mL de la disolución de quitosano a un vaso precipitado de 1 L. Se agitó ligeramente para humedecer todos los granos. Se separaron los granos humedecidos de la disolución residual mediante un colador plástico y finalmente se secaron los granos a temperatura ambiente por 72 h.

2. Se preparó un segundo tipo de recubrimiento para los granos de quinua, basado en almidón de maíz, quitosano y sorbitol (Bourtoom y Chinnan, 2008). Primero se disolvió almidón de maíz (4%w/v) en agua destilada mediante agitación a 333 r.p.m., utilizando Heavy Duty Laboratory Stirrer (G.K. Heller Corp., USA) y calentamiento a 85°C durante 5 min mediante una placa calefactora Barnstead Thermolyne, Super Nuova hasta lograr la gelatinización. Se enfrió el producto hasta 27°C.

A continuación, se disolvió quitosano (2%w/v) en ácido acético (1%w/v) mediante agitación a 500 r.p.m. (Barnstead Thermolyne, Super Nuova). Se calentó la solución de ácido acético (1%w/v) (80 mL) hasta 80°C y se agregó poco a poco el quitosano en el vórtice de la mezcla, manteniendo siempre una fuerte agitación. Se aforó con ácido acético (1%w/v) hasta 100 mL, se desgasificó esta disolución durante 10 min mediante ultrasonido (Ultrasonic, E 30 H, Elma Schmidbauer GmbH, Germany).

Posteriormente, se preparó una mezcla de 100 mL de disolución de almidón de maíz (4%w/v), 100 mL de disolución de quitosano (2%w/v) y 4 g de sorbitol como agente plastificante. Esta mezcla se agregó a un vaso precipitado (1 L) con 250 g de granos de quinua. Se agitó levemente para humedecer los granos y a continuación se utilizó un colador para separar los granos humedecidos de la disolución residual. Se dejaron los granos durante 10 h a 55°C y se enfriaron a temperatura ambiente.

3. Se preparó un tercer recubrimiento para los granos de quinua, compuesto de gelatina, quitosano y glicerol (Pereda et al., 2011). Primero, se preparó una disolución de quitosano de 2%w/v, disolviendo quitosano en una solución de ácido acético de 1%v/v bajo agitación continua durante 2 h a 500 r.p.m. (Barnstead Thermolyne, Super Nuova). Se calentó la solución de ácido acético (1%w/v) (80 mL) hasta 80°C y se agregó poco a poco el quitosano en el vórtice de la mezcla, manteniendo siempre una fuerte agitación. Se aforó con ácido acético (1%w/v) hasta 100 mL. Se agregaron 0,56 g de glicerol como agente plastificante a 100 mL de disolución de quitosano.

A continuación, se preparó una solución tampón de fosfato de sodio (0,1 M), pH 7,0. Se agregaron 2,5 g de gelatina a 100 mL de la solución tampón bajo agitación a 333 r.p.m. (Heavy Duty Laboratory Stirrer, G.K. Heller Corp., USA) durante 15 min a 35°C (Barnstead Thermolyne, Super Nuova). Se agregaron 0,70 g de glicerol como agente plastificante a 100 mL de disolución de gelatina.

Después se mezclaron 100 mL de disolución de quitosano/glicerol y 100 mL de gelatina/glicerol. La acidez de la mezcla resultante se ajustó a pH 5,0 con NaOH (0,2 N) y se agitó a 333 r.p.m. (Heavy Duty Laboratory Stirrer, G.K. Heller Corp., USA) durante 30 min a 35°C (Barnstead Thermolyne, Super Nuova). Luego, se agregaron 250 g de granos de quinua y 200 mL de la mezcla final de quitosano, gelatina y glicerol a un vaso precipitado (1 L) y se agitó ligeramente para humedecer los granos. A través de un colador plástico se separaron los granos humedecidos del líquido residual. Finalmente, se secaron los granos de quinua humedecidos a 35°C en un horno convectivo hasta masa constante.

2.2.3 Alveometría

Para evaluar las características mecánicas del recubrimiento, es necesario hacer mezclas de harina de quinua (HQ) y harina de trigo (HT) y se determinaron mediante el Alveograph Chopin (Modelo Alveographe NG, Chopin, Francia) según el método de AACC (2000), la tenacidad (P), extensibilidad (L) y energía de deformación (W). Esto permitió evaluar las mezclas adecuadas de HQ y HT, y seleccionar las mejores razones de HT/HQ para optimizar su utilización desde el punto de vista económico y nutricional de acuerdo a Astiz et al., (2013). Una vez estandarizada se evaluaron las harinas de quinua tratadas con tres tratamientos térmicos (cañón expansor, extrusor y horno de microondas).

2.2.4 Tratamientos térmicos de granos

Se utilizaron tres métodos de tratamiento térmico para generar insuflados de quinua, cuya expansión se evaluó según Tacora Cauna et al. (2010).

Inflado mediante cañón expansor

Se introdujeron 250 g de granos de quinua en la cámara del equipo de inflado de cereales, similar al cañón expansor, modelo A3 (Baghouse Storeroom Inc., Hanam, Gyeonggi, Corea) (Lee et al., 2019). Una vez sellada, la cámara se giró manualmente mientras se calentaba con llama de gas licuado de propano (GLP) hasta que la presión interna alcanzó los 0,27, 0,62, 0,96 o 1,31 MPa, seguido por una liberación repentina de la presión a presión atmosférica (0,10 MPa) al abrir la tapa y lograr la expansión de los granos de quinua. El tiempo para alcanzar la presión de operación final varía entre 13 y 20 min. Después del insuflado las muestras se enfriaron a temperatura ambiente y luego se almacenaron en bolsas con cierre hermético a temperatura ambiente para su posterior análisis.

El consumo de la energía por el cañón expansor se calculó mediante la siguiente fórmula (Bravo, 2017):

$$H_{gas} = m_{gas} \cdot PC_{gas}$$

Donde:

m_{gas} : masa de gas de propano (kg);

PC_{gas} : poder calorífico de gas propano ($J\ kg^{-1}$).

El valor de PC_{gas} es $46.434\ J\ kg^{-1}$ (Bravo, 2017).

Inflado mediante extrusor

El proceso de extrusión se realizó utilizando un extrusor (modelo UDPH-7, Kaifeng Youdo Machinery Co. LTD. Henan, China) de tornillo simple de 33,92 mm de diámetro. La longitud total del cilindro del extrusor es de 121,05 mm, lo que da una relación de longitud a diámetro (L/D) de 3,57. Se utilizó una boquilla de salida con un diámetro de 2,72 mm para todas las pruebas de extrusión. El extrusor consistía en tres zonas de temperatura. El perfil de temperatura media corresponde a $16^{\circ}C$ (temperatura ambiental) para la zona de alimentación, $45^{\circ}C$ para la zona de transporte y 110 a $120^{\circ}C$ para la zona de cizalle. La velocidad de alimentación de granos de quinua se fijó en $43\ kg\ h^{-1}$. La velocidad del tornillo del extrusor fue de 500 rpm. Las condiciones del proceso de insuflado se evaluaron a través del índice de expansión. Los extruidos se almacenaron en bolsas herméticas ziploc a temperatura ambiente para los análisis posteriores.

La energía mecánica específica (EME) es la entrada de energía mecánica por unidad de masa de extruido. Se calculó según Godavarti & Karwe (1997):

$$EME = \frac{((Torque)_{total} - (Torque)_{fricción}) \cdot N \cdot P_{motor}}{(Torque)_{par} \cdot N_{max} \cdot m_f}$$

Donde $(Torque)_{total}$ es el valor máximo del torque que entrega el motor ($(Torque)_{total} = 600\ N\ m$), $(Torque)_{fricción}$ corresponde a la pérdida de torque por fricción ($(Torque)_{fricción} = 500\ N\ m$), N es la velocidad giratoria del tornillo ($N = 500\ rpm$), P_{motor} es el consumo máximo de energía del motor de accionamiento ($P_{motor} = 4.700\ W$), $(Torque)_{par}$ es el par generado por el motor en el extrusor ($(Torque)_{par} = 71\ N\ m$), N_{max} es la velocidad de giro del motor ($N_{max} = 600\ rpm$) y m_f es el caudal másico total ($kg\ s^{-1}$) a través del cilindro del extrusor.

Inflado mediante microondas

Los insuflados de granos en un horno de microondas (Claassy720, Ursus Trotter S.A., Chile) se realizaron a 120, 600, 960 y 1200 W por 60 s, utilizando 60 g de quinua por prueba (Sharma et al., 2014). Los efectos de las condiciones del proceso de inflado se evaluaron mediante alveometría e índice de expansión, estableciendo así las condiciones óptimas del proceso. Se realizaron tres repeticiones por condición de operación. Las muestras insufladas se almacenaron en bolsas herméticas a temperatura ambiente para los análisis posteriores.

El consumo de energía mecánica específico (EME) del inflado por el horno de microondas se determinó utilizando la siguiente ecuación (Minati & Das, 2011)

$$EME = Consumo\ de\ energia\ (W) * Tiempo\ (s) * Masa\ del\ producto\ (Kg)$$

2.2.5 Diseño estadístico

El diseño experimental fue definido como un modelo completamente aleatorio, con tres tratamientos en triplicado. Los datos fueron analizados usando en software R (The R Project for Statistical Computing). Los análisis de los datos se realizaron por ANDEVA y las diferencias de medias por el test de Tukey con un 95% de confianza ($p < 0,05$).

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Selección del tipo de recubrimiento

En la primera etapa se seleccionó el tipo de recubrimiento mediante alveometría y potencias de horno microondas, el recubrimiento escogido se someterá a procesos de inflado por cañón expansor, horno microondas y extrusor.

La mezcla de 15% de harina de quinua y 85% de harina de trigo fue seleccionada según los parámetros alveométricos de sobrepresión máxima *versus* abscisa media de ruptura y energía de deformación de la masa para estudiar el tipo de recubrimiento de la quinua y determinar la potencia óptima de operación del horno de microondas (Apéndice 1). Los resultados para los recubrimientos de quinua se presentan en la Tabla 2.1, donde la presión máxima (P) es una medida de la elasticidad de la masa y la abscisa media en la ruptura (L) es una medida de extensibilidad de la masa. En este estudio, la relación de elasticidad a extensibilidad de la masa varió entre 0,16 a 0,28, mientras la energía de deformación de la masa (W) que representa la energía necesaria para inflar la masa hasta el punto de ruptura, osciló entre 199 a $590 \cdot 10^{-4}$ J.

Tabla 2.1. Parámetros de alveometría de granos de quinua tratados mediante microondas con y sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Quinua	Potencia (W)	P (mm)	L (mm)	W (10^{-4} J)	P/L	Insuflado
Materia Prima	120	8,29	35,9	230	0,23	No
	600	7,55	39,2	223	0,19	No
	960	7,90	48,2	261	0,16	No
	1200	7,92	44,4	240	0,18	Si
Recubrimiento N°1	120	9,66	34,3	279	0,28	No
	600	8,69	38,1	207	0,23	No
	960	8,49	40,3	590	0,21	No
	1200	8,18	31,7	199	0,26	Si
Recubrimiento N°2	120	7,57	43,9	245	0,17	No
	600	7,23	46,3	274	0,16	No
	960	7,35	43,9	263	0,17	No
	1200	6,90	39,8	242	0,17	Si
Recubrimiento N°3	120	8,73	42,7	320	0,21	No
	600	8,12	37,5	289	0,22	No
	960	8,84	43,3	333	0,20	No
	1200	9,35	34,3	326	0,27	Si

P: Sobrepresión máxima; L: abscisa media en la ruptura; P/L: relación de configuración de la curva; W: energía de deformación de la masa.

Gran parte de los granos de quinua con los recubrimientos, tratados por microondas a 120, 600 y 960 W durante 60 segundos, no lograron expandirse según observación visual, no así en el caso de 1200 W (Figura 2.2).

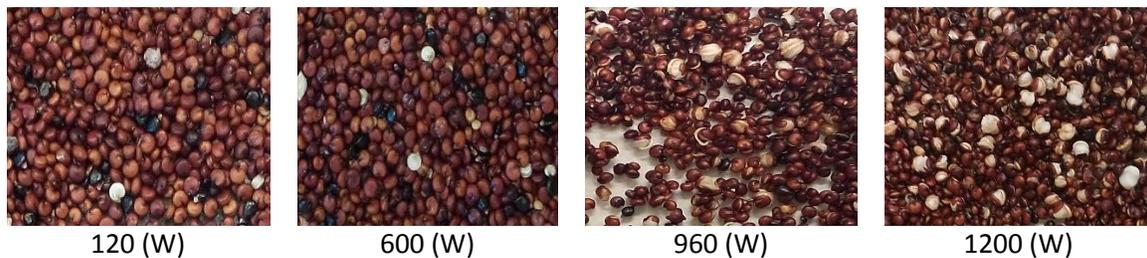


Figura 2.2. Inflado de quinua con recubrimiento N°. 2 mediante horno microondas a diferentes potencias. Fuente: elaboración propia.

La elección del tipo de recubrimiento para los posteriores tratamientos se basó en la alveometría, en donde se evaluó la extensibilidad de la masa de la mezcla de harinas a 1200 W. El recubrimiento N°2, compuesta por almidón de maíz, quitosano, sorbitol y ácido acético, tuvo la menor razón elasticidad / extensibilidad (0,17), mientras que el recubrimiento N°1 compuesta de yuca, quitosano, glicerol y ácido acético, y N°3 compuesta de gelatina, quitosano, glicerol y ácido acético, tuvieron 0,26 y 0,27 respectivamente. Adicionalmente, cabe señalar que los resultados de alveometría están basados en harina de quinua procesada que ha perdido su estructura original, mientras que el proceso de inflado tiene directa relación con el grano como tal.

Considerando el quitosano como polímero natural compuesto principalmente de β -(1-4)-D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina (Anitha et al., 2014), la mezcla de hidrocoloides de almidón de maíz y quitosano, plastificados con glicerina, permite mejorar las propiedades mecánicas como elongación a la rotura y permeabilidad al vapor de agua debido a interacciones entre los grupos hidroxilo del almidón y los grupos amino del quitosano (Liu et al., 2009). Entonces, de acuerdo a los resultados anteriores, la condición óptima de proceso corresponde a un tratamiento térmico por microondas a 1200 W durante 60 segundos, aplicando el recubrimiento con almidón de maíz, quitosano, sorbitol y ácido acético. Bajo estas condiciones se realizaron los procesos térmicos siguientes.

2.3.2 Condiciones de procesos térmicos

La evaluación de los procesos de inflado mediante el consumo de energía puede realizarse, ya que está en directa relación con el índice de expansión (IE) utilizada comúnmente para cuantificar las propiedades del insuflado. En lo general se espera que los productos insuflados tengan una estructura porosa, bien expandida para que sean preferidos por los consumidores. Una gran expansión y baja densidad son las características más deseadas para los productos de expansión directa (Luyten et al., 2004). A continuación, se presentan los resultados de expansión para los tratamientos térmicos mediante cañón expansor (Figura 2.3), extrusor (Figura 2.4) y horno de microondas (Figura 2.5).

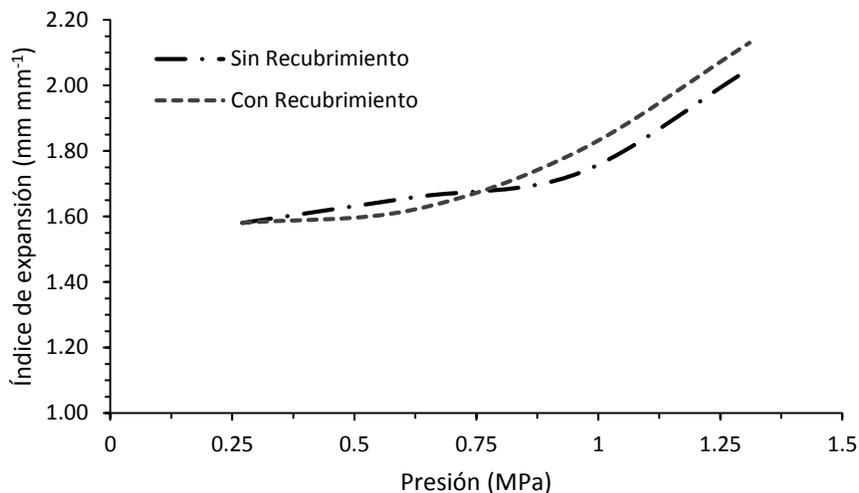


Figura 2.3. Expansión de granos de quinua con y sin recubrimiento a 20 % de humedad (bh) tratados mediante cañón expansor en función de la presión de operación. Fuente: elaboración propia.

Las condiciones de operación del cañón expansor fueron seleccionadas en base a la relación del índice de expansión y la presión a una humedad de 20 % (bh). El rango de presión para el procesamiento mediante cañón expansor fue de 0,27 - 1,31 MPa, donde la presión máxima está limitada por el quemado de los granos. Los granos de quinua se calentaron continuamente dentro de la cámara giratoria con forma de bola. Se utilizó llama directa de gas propano como fuente de calor durante el proceso de expansión. Al final del proceso de calentamiento, la estructura y la textura de los granos cambiaron por una liberación repentina de la presión interna y del vapor de agua. En la Figura 2.3 se observa un mayor grado de expansión en granos con recubrimiento en comparación con granos sin recubrimiento a partir de 0,75 MPa de presión. El recubrimiento permitió conservar mejor el vapor de agua dentro de los granos. La mayor expansión está en el rango de 1,31 a 1,33 MPa. Estos valores están dentro del rango reportado por Hoke et al. (2007), con índices de expansión de 1,70 - 2,13 mm mm⁻¹. Las condiciones óptimas de proceso corresponden a una presión de 1,31 MPa, con contenido de humedad de 20% bh de los granos. En la Figura 2.3 se observa que un incremento de presión permite obtener un mayor índice de expansión; esto concuerda con lo observado por Shewry & Halford (2002).

Las condiciones de operación del extrusor de tornillo simple fueron seleccionadas en base a la humedad, índice de expansión y facilidad de extrusión de los granos de quinua. Las muestras inferiores a 16 % de humedad (bh) resultaron con bajo índice de expansión (Figura 2.4), y causaron que el extrusor se atascó debido a la acumulación de granos de quinua, mientras a humedades de 16 a 20 % (bh) proporcionaron como resultado el mayor índice de expansión, y la facilidad de extrusión sin atascos. Por otro lado, las muestras superiores a 20 % de humedad resultaron un bajo índice de expansión y facilidad de extrusión. Por lo tanto, la condición óptima del proceso de extrusión para producir extruidos de granos de quinua con y sin recubrimiento según el índice de expansión fue una humedad entre 16 y 20 % (bh), considerando un caudal de alimentación de 42,75 kg h⁻¹, una temperatura dentro de la zona de dosificación de 110 a 120°C y una velocidad de tornillo de 500 rpm.

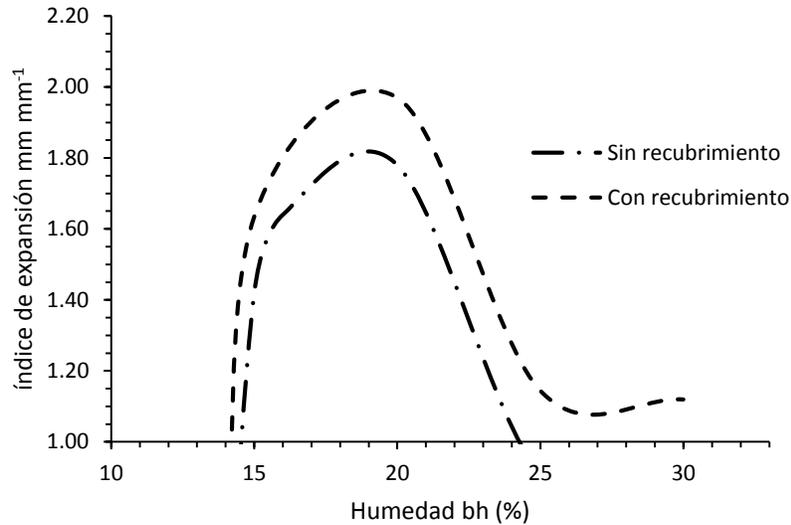


Figura 2.4. Expansión de granos de quinua con y sin recubrimiento tratados mediante extrusor de tornillo simple en función de la humedad. Fuente: elaboración propia.

El índice de expansión osciló entre 1,25 a 1,97 donde las muestras con recubrimiento dieron como resultado un mayor índice de expansión (Figura 2.4). Esta variación se debe a la humedad del grano y al tipo de recubrimiento. A mayor humedad fomenta el mezclado por el tornillo y la gelatinización de la masa fundida, mientras que a baja humedad resulta una disminución en el índice de absorción de agua, causando la dextrinización en lugar de la gelatinización del almidón. El máximo índice de expansión fue de 1,97 que es mayor en comparación con estudios con quinua de la variedad Cherry Vanilla que presentó un valor de 1,67 (Kowalski et al., 2016) e inferior a los estudios en quinua que informaron un valor de 3,8 (Dogan & Karwe, 2003) y 4,0 en harina de maíz (Chinnaswamy & Hanna, 1988). Esta diferencia posiblemente puede atribuirse al tipo de extrusor (simple y doble tornillo) y también al tamaño de las partículas. Alam et al. (2014) demostraron que la reducción del tamaño de partículas en salvado de centeno (28 μm) aumentó significativamente la expansión en comparación con partículas gruesas (440 μm) de centeno. Puede atribuirse este efecto a la composición química de la quinua, en particular por la presencia de la fibra insoluble (Alam et al., 2014). Se sabe que el alto contenido de fibra insoluble disminuye la expansión (Kirjoranta et al., 2012), las fibras insolubles tienden a retener agua durante el calentamiento por extrusión, reduciendo así el vapor creado. Además, tienden a ser más rígidas en comparación con polímeros a base de almidón, y esto puede impedir la expansión (Ganjyal et al., 2004). Así las muestras inferiores a 16% y superiores a 20 % de humedad (bh), presentaron un bajo índice de expansión. Otros investigadores han reportado la misma tendencia (Ding et al., 2006; Kowalski et al., 2015). En general, debido a la buena expansión, el ecotipo Roja INIA parece ser apto para ser transformado en snacks extruidos.

En la Figura 2.5 se muestran los resultados de los índices de expansión para granos de quinua tratados a diferentes potencias de microondas, para un contenido de humedad 20 % (bh) y tiempo de residencia en el horno de microondas de 60 segundos para todas las pruebas.

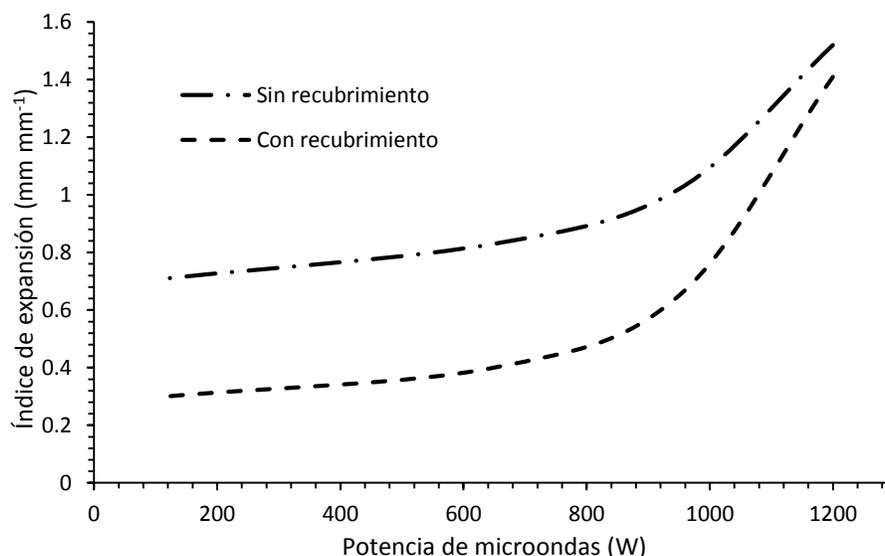


Figura 2.5. Expansión de granos de quinua con y sin recubrimiento tratados mediante horno de microondas en función de la potencia. Fuente: elaboración propia.

Las propiedades dieléctricas del agua facilitan la absorción de la energía de las microondas para realizar la expansión de los granos. Según ensayos preliminares, las muestras de los granos de quinua acondicionadas a 15 % de contenido de humedad tardaron en expandirse, en comparación con las muestras acondicionadas a 18 y 20 % de humedad. Esto puede haber sido causado por el contenido de humedad y almidón en la parte interior del grano. Una baja humedad genera baja presión de vapor y en consecuencia los granos se queman. Chang y Chang, (1995) estudiaron el índice de expansión en arroz y llegaron a la conclusión que un alto contenido de amilosa no es adecuado para la hinchazón, proporcionando un índice de hinchamiento más bajo que el arroz con un contenido de amilosa medio. También está fuertemente influenciada la expansión por la morfología y la composición del núcleo (Mariotti et al., 2006). Además, el producto resultante de microondas puede no tener la misma expansión en comparación con los métodos convencionales ya que el tiempo de residencia es corto, además el patrón de calentamiento no es tan uniforme (Joshi et al., 2014). La falta de una barrera contra la humedad, como el pericarpio de las palomitas de maíz, conduce a un gradiente de temperatura inverso en los granos de quinua y una pérdida significativa de humedad antes y después de la expansión. En consecuencia, la condición de proceso por microondas recomendada es la siguiente: contenido de humedad del grano de quinua de 18 – 20 % bh, potencia de microondas de 1200 W, tiempo de residencia 60 segundos y carga 60 g de muestras de quinua.

2.3.3 Consumo de energía

La energía mecánica específica (EME) es el resultado del cálculo de la entrada de energía del motor impulsor y su transferencia al material (Wang et al., 2017). La cantidad de energía mecánica que ingresa al sistema es un indicador o medida en que el material experimenta una transformación física de sus estructuras macromoleculares (Godavarti & Karwe, 1997). Los valores se muestran en la Tabla 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2. Índice de expansión y energía mecánica específica (EME) en muestras sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Índice de expansión (mm mm ⁻¹)	EME (kJ kg ⁻¹)
Microondas	1,52±0,34 ^a	1200
Cañón expansor	2,05±0,25 ^c	9,27
Extrusor	1,78±0,07 ^b	489

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Valores con diferentes letras en una misma columna significa diferencia estadísticamente significativa en p<0,05.

Tabla 2.3. Índice de expansión y energía mecánica específica (EME) en muestras con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Índice de expansión (mm mm ⁻¹)	EME (kJ kg ⁻¹)
Microondas – CR	1,41±0,38 ^a	1200
Cañón expansor – CR	2,13±0,23 ^c	6,96
Extrusor - CR	1,97±0,20 ^b	425

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Valores con diferentes letras en una misma columna significa diferencia estadísticamente significativa en p<0,05.

Los valores de EME para el extrusor oscilaron entre 424 y 489 kJ kg⁻¹ y están dentro del rango reportado por Kowalski et al. (2016). El elevado consumo de energía en el extrusor podría deberse a una mayor fricción y corte en el cilindro del extrusor generando un retraso en la gelatinización del almidón (Kirjoranta et al., 2016), siendo un mecanismo de generación de calor distinto en comparación con el cañón expansor u horno de microondas. Los valores de consumo de energía de horno microondas son inferiores a lo reportado por Swarnakar et al., (2014) determinaron el consumo de energía de 2667 kJ/kg para inflado de arroz, esta variación debido a las condiciones del grano como humedad, grosor del pericarpio, contenido del pericarpio. Mientras para cañón expansor no se encontraron antecedentes de consumo de energía.

2.4 Conclusión

El recubrimiento compuesto por almidón de maíz, quitosano, sorbitol y ácido acético permitió mejorar las características de índice de expansión de 2,13 y 1,97 mm mm⁻¹ para los procesos por cañón expansor y extrusor respectivamente. Las condiciones óptimas de fueron de 1,31 – 1,33 MPa para cañón expansor, 500 rpm para extrusor y 1200 W para microondas, todas a 20% bh. El menor consumo de energía se presentó en el proceso por cañón expansor 6,96 kJ kg⁻¹. Finalmente, estos resultados indican que a partir de este grano se pueden desarrollar productos insuflados de buena calidad.

2.5 Bibliografía

AACC. (2000). Approved Methods of the AOAC. 10th edition. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, USA.

- Abderrahim, F., Huanatico, E., Segura, R., Arribas, S., Gonzalez, M. C., & Condezo-Hoyos, L. (2015). Physical features, phenolic compounds, betalains and total antioxidant capacity of coloured quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) from Peruvian Altiplano. *Food Chemistry*, *183*, 83–90.
- Alam, S. A., Järvinen, J., Kirjoranta, S., Jouppila, K., Poutanen, K., & Sozer, N. (2014). Influence of particle size reduction on structural and mechanical properties of extruded rye bran. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(7), 2121–2133.
- Anitha, A., Sowmya, S., Kumar, P. T. S., Deepthi, S., Chennazhi, K. P., Ehrlich, H., Tsurkan, M., Jayakumar, R. (2014). Chitin and chitosan in selected biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, *39*(9), 1644–1667.
- Astiz, V., Molfese, E., & Seghezzo, L. (2013). Panificación de harinas mezcla de trigo y quinua. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*, *3*(5), 53–60.
- Bangyekan, C., Aht-Ong, D., & Srikulkit, K. (2006). Preparation and properties evaluation of chitosan-coated cassava starch films. *Carbohydrate Polymers*, *63*(1), 61–71.
- Bergesse, A. E., Boiocchi, P. N., Calandri, E. L., Cervilla, N. S., Gianna, V., Guzmán, C. A., Miranda, V. P. P., Montoya, P. A. & Mufari, J. R. (2015). *Aprovechamiento integral del grano de quinua. Aspectos tecnológicos, fisicoquímicos, nutricionales y sensoriales*. (1a ed.) (Grasso Florencia V. Ed.), Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 262 p.
- Bourtoom, T., & Chinnan, M. S. (2008). Preparation and properties of rice starch-chitosan blend biodegradable film. *LWT - Food Science and Technology*, *41*(9), 1633–1641.
- Bravo, H. A. (2017). Implementación de una planta de jugo de uva enriquecido en una industria vitivinícola. *Tesis para optar al Título de Ingeniero en Alimentos, Universidad de Concepcion, Campus Chillán, Chile*, 88 p.
- Chandrasekhar, P. R., & Chattopadhyay, P. K. (1990). Studies on microstructural changes of parboiled and puffed rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, *14*(1), 27–37.
- Chang, S. M., & Chang, T. L. (1995). The characteristics of explosion puffing rice products with different amylose contents. *Journal of Food Science*, *22*, 465–478.
- Chen, C. M., & Yeh, A. I. (2001). Effect of amylose content on expansion of extruded rice pellet. *Cereal Chemistry*, *78*(3), 261–266.
- Chinnaswamy, R., & Hanna, M. A. (1988). Optimum extrusion-cooking conditions for maximum expansion of corn starch. *Journal of Food Science*, *53*(3), 834–836.
- De Cindio, B., Gabriele, D., Maria Pollini, C., Peressini, D., & Sensidoni, A. (2002). Filled snack production by co-extrusion-cooking: 1. Rheological modelling of the process. *Journal of Food Engineering*, *52*(1), 67–74.
- Ding, Q. B., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G., & Marson, H. (2006). The effect of extrusión conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, *73*(2), 142–148.
- Doğan, H., & Karwe, M. V. (2003). Physicochemical properties of quinoa extrudates. *Food Science Technology International*, *9*(2), 101–114.

- Erba, D., Hidalgo, A., Bresciani, J., & Brandolini, A. (2011). Environmental and genotypic influences on trace element and mineral concentrations in whole meal flour of einkorn (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*). *Journal of Cereal Science*, *54*(2), 250–254.
- Filho, A. M. M., Pirozi, M. R., Borges, J. T. D. S., Pinheiro Sant'Ana, H. M., Chaves, J. B. P., & Coimbra, J. S. D. R. (2017). Quinoa: Nutritional, functional, and antinutritional aspects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *57*(8), 1618–1630.
- Ganjyal, G., & Hanna, M. (2002). A review on residence time distribution (RTD) in food extruders and study on the potential of neural networks in RTD modeling. *Journal of Food Science*, *67*(6), 1996–2002.
- Ganjyal, G. M., Reddy, N., Yang, Y. Q., & Hanna, M. A. (2004). Biodegradable packaging foams of starch acetate blended with corn stalk fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, *93*(6), 2627–2633.
- Godavarti, S., & Karwe, M. V. (1997). Determination of specific mechanical energy distribution on a twin-screw extruder. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *67*(4), 277–287.
- Gökmen, S. (2004). Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. *Journal of Food Engineering*, *65*(3), 357–362.
- Hagenimana, A., Ding, X., & Fang, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, *43*(1), 38–46.
- Hidalgo, A., & Brandolini, A. (2008). Protein, ash, lutein and tocopherols distribution in einkorn (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*) seed fractions. *Food Chemistry*, *107*(1), 444–448.
- Hoke, K., Houška, M., Průchová, J., Gabrovská, D., Vaculová, K., & Paulíčková, I. (2007). Optimisation of puffing naked barley. *Journal of Food Engineering*, *80*(4), 1016–1022.
- Hoseney, R. C., Zeleznak, K., & Abdelrahman, A. (1983). Mechanism of popcorn popping. *Journal of Cereal Science*, *1*(1), 43–52.
- Hui, Y. H., & Özgül Evranuz, E. (2016). *Handbook of Vegetable Preservation and Processing*. 2nd Ed. CRC Press, Boca Raton.
- Joshi, N. D., Mohapatra, D., & Joshi, D. C. (2014). Varietal selection of some indica rice for production of puffed rice. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(1), 299–305.
- Kirjoranta, S., Solala, K., Suuronen, J. P., Penttilä, P., Peura, M., Serimaa, R., Jouppila, K. (2012). Effects of process variables and addition of polydextrose and whey protein isolate on the properties of barley extrudates. *International Journal of Food Science and Technology*, *47*(6), 1165–1175.
- Kirjoranta, S., Tenkanen, M., & Jouppila, K. (2016). Effects of process parameters on the properties of barley containing snacks enriched with brewer's spent grain. *Journal of Food Science and Technology*, *53*(1), 775–783.
- Kowalski, R. J., Medina-Meza, I. G., Thapa, B. B., Murphy, K. M., & Ganjyal, G. M. (2016). Extrusion processing characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) var. Cherry Vanilla. *Journal of Cereal Science*, *70*(1), 91–98.

- Kowalski, R. J., Morris, C. F., & Ganjyal, G. M. (2015). Waxy soft white wheat: Extrusion characteristics and thermal and rheological properties. *Cereal Chemistry*, 92(2), 145–153.
- Lee, H. J., Kim, S., Suh, H. J., & Ryu, D. (2019). Effects of explosive puffing process on the reduction of ochratoxin A in rice and oats. *Food Control*, 95, 334–338.
- Li, G., & Zhu, F. (2018). Quinoa starch: Structures, properties, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 181, 851–861.
- Liu, F., Qin, B., He, L., & Song, R. (2009). Novel starch/chitosan blending membrane: Antibacterial, permeable and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 78(1), 146–150.
- Luyten, H., Plijter, J. J., & van Vliet, T. (2004). Crispy/crunchy crusts of cellular solid foods: A literature review with discussion. *Journal of Texture Studies*, 35, 445–492.
- Mariotti, M., Alamprese, C., Pagani, M. A., & Lucisano, M. (2006). Effect of puffing on ultrastructure and physical characteristics of cereal grains and flours. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 47–56.
- Minati, M., & Das, S. K. (2011). Effect of Process Parameters and Optimization on Microwave Puffing Performance of Rice. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 15(2), 455–461.
- NTP. (2009). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). Requisitos. Norma Técnica Peruana. NTP 205.062. Comisión de Normalización y de Fiscalización de Barreras Comerciales No Arancelarios. INDECOPI. Lima, Perú.
- Pereda, M., Ponce, A. G., Marcovich, N. E., Ruseckaite, R. A., & Martucci, J. F. (2011). Chitosan-gelatin composites and bi-layer films with potential antimicrobial activity. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 1372–1381.
- Prego, I., Maldonado, S., & Otegui, M. (1998). Seed structure and localization of reserves in *Chenopodium quinoa*. *Annals of Botany*, 82(4), 481–488.
- Ramos-Diaz, J. M., Suuronen, J. P., Deegan, K. C., Serimaa, R., Tuorila, H., & Jouppila, K. (2015). Physical and sensory characteristics of corn-based extruded snacks containing amaranth, quinoa and kañiwa flour. *LWT - Food Science and Technology*, 64(2), 1047–1056.
- Reguera, M., & Haros, C. M. (2017). Structure and Composition of Kernels: In: *Pseudocereals: Chemistry and Technology*. In Haros, C. M. & Schönlechner, R. (Eds.), (pp. 28–48). Oxford: John Wiley & Sons, Ltd., Chichester - West Sussex, UK.
- Ruales, J., & Nair, B. M. (1994). Properties of starch and dietary fibre in raw and processed quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd) seeds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 45(3), 223–246.
- Salazar-González, C., San Martín-González, M. F., López-Malo, A., & Sosa-Morales, M. (2012). Recent studies related to microwave processing of fluid foods. *Food and Bioprocess Technology*, 5(1), 31–46.
- Schwartzberg, H. G., Wu, J. P. C., Nussinovitch, A. & Mugerwa, J. (1995). Modelling deformation and flow during vapor-induced puffing. *Journal of Food Engineering*, 25(3), 329–372.
- Sharma, V., Champawat, P., & Mudgal, V. (2014). Process development for puffing of Sorghum. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 2(1), 164–170

- Shewry, P. R., & Halford, N. G. (2002). Cereal seed storage proteins: Structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*, 53(370), 947–958.
- Song, A., & Eckhoff, S. R. (1994). Optimum popping moisture content for popcorn kernels of different sizes. *Cereal Chemistry*, 71(5), 458–460.
- Swarnakar, A. K., Devi, M. K., & Das, S. K. (2014). Popping characteristics of paddy using microwave energy and optimization of process parameters. *International Journal of Food Studies*, 3(1), 45–59.
- Tacora Cauna, R. L., Mercado, G. I. L., Portocarrero, R. B., Hanco, J. M., Yucra, M. C., & Ibañez Quispe, V. (2010). Efecto de la presión de expansión por explosión y temperatura de tostado en algunas características funcionales y fisicoquímicas de dos variedades de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). *Journal de Ciencia y Tecnología Agraria*, 2(1), 188–198.
- Van der Sman, R. G. M. (2016). Filler functionality in edible solid foams. *Advances in Colloid and Interface Science*, 231, 23–35.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 90(15), 2541–2547.
- Wang, S., Kowalski, R. J., Kang, Y., Kiszonas, A. M., Zhu, M. J., & Ganjyal, G. M. (2017). Impacts of the particle sizes and levels of inclusions of cherry pomace on the physical and structural properties of direct expanded corn starch. *Food and Bioprocess Technology*, 10(2), 394–406.
- Wang, S., & Zhu, F. (2016). Formulation and quality attributes of quinoa food products. *Food and Bioprocess Technology*, 9(1), 49–68.
- Yana Quispe, S. (2015). Caracterización y determinación de la digestibilidad proteica de quinua insuflada en 3 variedades (*Chenopodium quinoa* Willd). *Tesis para optar al Título de Ingeniero Agroindustrial, Universidad Nacional Del Altiplano Puno, Perú*, 96 p.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S., & Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), 524–534.

Capítulo 3. Caracterización de las propiedades físicas, químicas y nutricionales de insuflados de quinua

3.1 Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) pertenece a la familia Chenopodiaceae y es cultivada durante siglos en países como Perú y Bolivia. Actualmente genera gran interés de investigación, no solo por su perfil nutricional sino por su amplia diversidad genética y gran adaptabilidad a diversas condiciones agroecológicas, siendo un cultivo alternativo frente al cambio climático y para la seguridad alimentaria (Bojanic, 2011; Aziz et al., 2018; Encina-Zelada et al., 2017). En particular, su contenido de proteína varía entre 13,8 y 16,5 % de materia seca (MS) (Agza et al., 2018; Navruz-Varli & Sanlier, 2016). La mayoría de las proteínas almacenadas en la quinua está compuesta de albuminas (35%), globulinas (37%) y prolaminas presentes en concentraciones más bajas (Abugoch James, 2009). Además, presenta aminoácidos esenciales, siendo lisina (6,9%) y metionina (4,2%) las más relevantes, superiores a la chíya y amaranto (López et al., 2018). El almidón es el principal carbohidrato de la quinua que constituye alrededor del 30 - 70 % de la materia seca (Li & Zhu, 2018); los gránulos de almidón varían de 0,4 a 2,0 μm , usualmente están ubicados en el perispermo del grano. El almidón de la quinua está compuesto por amilosa y amilopectina; el contenido de amilosa varía entre 12,6 y 23,7 % (Li & Zhu, 2017). Por otra parte, contiene un 3% de azúcares, en su mayoría maltosa, D-galactosa, D-ribosa y bajos niveles de fructosa y glucosa (Abugoch James, 2009). Además, de lípidos (6,07 g/100 g), fibras (7,0 g/100 g), cenizas (2,7 g/100 g) (Navruz-Varli & Sanlier, 2016) y antioxidantes (Hu et al., 2017) con una buena disponibilidad de estos nutrientes (Vilcacundo et al., 2018). Otro aspecto importante, no contiene gluten y puede ser una alternativa para personas con enfermedades celíacas (Alvarez-Jubete et al., 2010).

Actualmente, los principales productores de quinua son Perú y Bolivia, que concentran el 90% de la producción. Luego, Ecuador, Estados Unidos y Canadá tienen cerca del 10% de la producción mundial. Chile ocupa el lugar 26 de acuerdo al volumen exportado (INIA, 2015). Sin embargo, el cultivo de la quinua se ha extendido a varios otros países, como Australia, Canadá, China, Inglaterra entre otros (Aziz et al., 2018). Todos estos países exportan en general, la materia prima sin ninguna transformación. Por esta razón, esta investigación propone dar valor agregado, mediante la aplicación de tres procesos térmicos (expansión, extrusión y procesamiento por microondas). El procesamiento por extrusión comprende operaciones como mezclar, cocinar, amasar, cizallar, moldear y dar forma al producto final, y se puede desarrollar una variedad de productos (Xu et al., 2016). La extrusión es típicamente un proceso de alta temperatura y tiempo corto (HTST). Por otra parte, los insuflados mediante microondas son generados debido a la fricción molecular de compuestos polares que intentan alinearse en el campo eléctrico oscilante (principalmente agua e iones) y producen fricción con otros componentes del alimento, generando una presión interna en el grano y en consecuencia, se produce la expansión, siendo un método eficiente y económico (Ahmed & Ramaswamy, 2007; Sumnu & Sahin, 2005). Existen estudios de insuflados que han observado que al aumentar los contenidos de proteína, fibra y la adición de agua al sistema, disminuye la expansión de los extruidos (Ramos Diaz et al., 2015). Por otro lado, un bajo contenido de amilosa se asocia a masas altamente elásticas que produce una mayor expansión y afectaría la calidad del producto final (Babin et al., 2007).

Zea Zea (2011), evaluó la cantidad y calidad proteica de harina de quinua sin y con extrusión de la variedad Negra Collana mediante análisis proximal, encontrándose que existe diferencia ($p < 0,05$) ya que la harina de quinua extruida presentó 14,02% de proteínas y la harina de quinua sin extrudir 14,94% de proteína.

De la Riva Tapia (2010), comparó el contenido de proteínas y polifenoles, y la capacidad antioxidante de quinua cruda y procesada, variedad Salcedo INIA. La proteína en quinua escarificada fue 14,27%, en quinua cocida 12,66% y en quinua tostada – cocida 7,93%. Los compuestos fenólicos en quinua escarificada fueron 70,03 mg ácido gálico/100 g MS, en quinua cocida 47,24 mg ácido gálico/100 g ms y en quinua tostada – cocida 53,31 mg ácido gálico/100 g ms. La capacidad antioxidante en quinua escarificada fue 5,99 $\mu\text{mol Trolox/g MS}$, en quinua cocida 4,51 $\mu\text{mol Trolox/g MS}$ y en quinua tostada – cocida 4,88 $\mu\text{mol Trolox/g MS}$.

Repo-Carrasco-Valencia & Serna, (2011), determinaron que la digestibilidad *in vitro* de proteínas de quinua estuvo entre 76 y 80,5% y la digestibilidad *in vitro* de almidón fue entre 65,1 y 68,7%. Este estudio demostró que la quinua puede considerarse una importante fuente de fibra dietética, polifenoles y otros compuestos antioxidantes. Además, el valor nutricional de la quinua mejoró mediante el proceso de extrusión. Cabe destacar que los insuflados son particularmente nutritivos, saludables, ricos en antioxidantes (Hidalgo & Brandolini, 2008), proteínas (Hidalgo & Brandolini, 2008), minerales (Erba et al., 2011) y fibras (Hidalgo & Brandolini, 2008).

El consumo de alimento ha cambiado con los estilos de vida moderna. Entre estos cambios está el mayor consumo de snacks. En el mercado actual los snacks son generalmente menos saludables que las comidas tradicionales, por lo tanto, existen probabilidades en el incremento de enfermedades como obesidad y desnutrición. Según FAO y OPS (2017), Chile está dentro de los países con mayores tasas de sobrepeso infantil con un 9,3%, superando el promedio de 7% para la población de menores de 5 años en América Latina y el Caribe; en la población adulta en las mujeres es de 32,8% y en hombres 24,8%. En consecuencia, pueden desarrollarse enfermedades no trasmisibles, como cardiovasculares, diabetes, hipertensión y cáncer siendo las principales causas de muerte en la región. Por otro lado, la quinua posee efectos positivos para la salud metabólica, cardiovascular y gastrointestinal en humanos (Navruz-Varli & Sanlier, 2016; Nowak et al., 2016), beneficiando a personas con intolerancia a la lactosa, mujeres propensas a osteoporosis, personas con anemia, diabetes, dislipidemia, obesidad y celíacos (Vega-Gálvez et al., 2010). Otro estudio reveló que el consumo diario de quinua por personas entre 18 y 45 años durante 30 días, redujo considerablemente sus triglicéridos, colesterol total y niveles de lipoproteína de baja densidad (LDL) (Farinazzi-Machado et al., 2012). Además los insuflados de cereales mejoran la digestibilidad del almidón, ya que implica la gelatinización del almidón y la degradación parcial de las fibras dietéticas (Holm et al., 1985; Navruz-Varli & Sanlier, 2016).

La nueva tendencia en la alimentación humana es consumir alimentos saludables, ricos en proteínas, aminoácidos, grasas insaturadas y compuestos bioactivos (Küster & Vila, 2017), y sostenibles que involucren agricultura, alimentación, nutrición y salud. La quinua insuflada es un snack listo para consumo que puede usarse en refrigerios y en el desarrollo de nuevos productos. Sin embargo, no hay suficientes investigaciones que determinen la calidad del grano de quinua insuflado. Por lo tanto, el objetivo de esta parte del estudio es caracterizar las propiedades físicas, químicas y nutricionales de los insuflados de granos de quinua, ecotipo Roja INIA, con y sin

recubrimiento, procesados mediante tres tratamientos térmicos (expansión, microondas y extrusión).

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Materia prima

Quinua (ecotipo Roja INIA) fue cultivada en Selva Negra, comuna de San Ignacio, Región de Ñuble, Chile (36°50'55,25''S; 72°8'25,31''O), cuyo suelo fue fertilizado con K, 200 kg K ha⁻¹; P, 100 kg ha⁻¹; N, 100 kg ha⁻¹; B 2 kg ha⁻¹ y Zn 1,8 kg ha⁻¹, y cosechada en marzo de 2018. Los granos fueron desaponificados y almacenados en bolsas con cierre hermético, al igual que las muestras procesadas mediante cañón expansor, extrusor y microondas (Capítulo 2), a temperatura ambiente (20 ± 2 °C) hasta su posterior procesamiento y análisis.

3.2.2 Propiedades físicas de la quinua

3.2.3 Forma

Para determinar la forma, se utilizaron tres fotografías de los granos de quinua antes y después del insuflado. Estas fueron tomadas con un microscopio electrónico de barrido SEM (JOEL JSM-6380 LV, Joel Ltd., Akishima, Japón), con un aumento de 30X. Se tomaron en posición de descanso. Las fotografías fueron escaneadas e importadas al software gráfico ImageJ (versión 1.50i), con la finalidad de trazar figuras geométricas que permiten determinar la forma del grano insuflado. Para lo cual se determinaron esfericidad, redondez y tasa de redondez de los granos de quinua, mediante el trazado de círculos circunscrito e inscrito en las imágenes de los granos de quinua en posición de descanso (Mohsenin, 1986), definiendo:

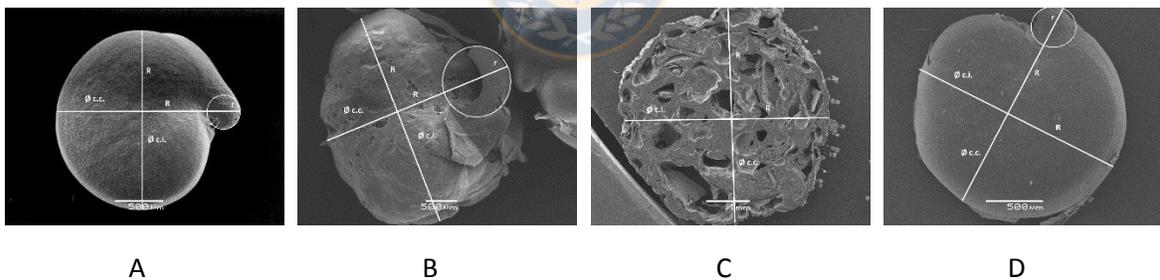


Figura 3.1. Mediciones de microfotografías de granos de quinua: (A) materia prima, (B) cañón expansor, (C) extrusor y (D) microondas. Fuente: elaboración propia.

$$Esfericidad = \frac{\varnothing c. i.}{\varnothing c. c.}$$

$$Tasa de redondez = \frac{r}{R}$$

$$Redondez = \frac{\sum r}{NR}$$

Donde:

- $\emptyset_{c.i.}$ = Diámetro del círculo inscrito (m);
- $\emptyset_{c.c.}$ = Diámetro del círculo circunscrito (m);
- $\sum r$ = Suma de los radios de círculos circunscritos (m);
- N = Número de círculos circunscritos;
- R = Radio del mayor círculo inscrito (m);
- r = Radio de la curvatura (m).

3.2.4 Tamaño

Se escogieron al azar 50 granos y se introdujeron a bolsas rotulados para facilitar el análisis. Cada grano fue medido en sus tres dimensiones: diámetro mayor (l), diámetro menor (a) y el espesor (h). El diámetro geométrico se calculó mediante la siguiente expresión (Figura & Teixeira, 2007):

$$d_e = (l * a * h)^{\frac{1}{3}}$$

3.2.5 Densidad

Densidad aparente

Se determinó este parámetro midiendo la masa del grano contenida en un volumen conocido (probeta), mediante una balanza analítica (M214A1, Bell Engineering srl, Italy). Las pruebas se realizaron por triplicado; la densidad aparente se calculó con la siguiente fórmula (Figura & Teixeira, 2007):

$$\rho_{aparente} = \frac{\text{masa (kg)}}{\text{volumen (m}^3\text{)}}$$

Densidad real

Se determinó este parámetro mediante un picnómetro (Figura & Teixeira, 2007). Consiste en los siguientes pasos:

1. Anotar la masa del picnómetro vacío (p_p);
2. Adicionar 10 g de granos de quinua al picnómetro ($p_{p+ \text{ producto}}$);
3. Cubrir el producto con etanol y eliminar posibles burbujas de aire alojadas entre los granos con una jeringa, completar el llenado con etanol y enrasar. Anotar la masa ($p_{p+ \text{ producto} + OH}$);
4. Llenar el picnómetro con etanol y enrasar. Anotar su masa ($p_{p+ OH}$).

Una vez determinados en triplicado los cuatro datos anteriores, se procedió al cálculo de la densidad real según Atares (2013):

$$m = p_{p+OH} - (p_{p+producto+OH} - (p_{p+producto} - p_p))$$

$$V_{real} = \frac{(p_{p+OH} - p_p)}{\rho_{OH}}; \rho_{real} = \frac{m}{V_{real}}$$

Porosidad

Se calculó este parámetro con los datos de la densidad aparente y densidad real usando siguiente fórmula (Figura & Teixeira, 2007):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{aparente}}{\rho_{real}}$$

3.2.6 Color

El color de los insuflados y extruidos de quinua (100 gramos), se determinó mediante la utilización de un colorímetro Hunterlab Color Quest II (Hunter Associates Laboratory, Inc., Reston, VA, USA), de acuerdo a los parámetros CIELAB (L^* , a^* , b^*). Las medidas de color se expresaron en términos de L^* ($L^* = 100$, máximo brillo; $L^* = 0$, máxima oscuridad); a^* ($+a^*$ = enrojecimiento; $-a^*$ = verdor) y b^* ($+b^*$ = amarillo; $-b^*$ = azul). El cambio de cada uno de los parámetros en relación a la materia prima se calculó de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta L^* = L^* - L_0^*$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^*$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^*$$

Donde el subíndice 0 corresponde a la materia prima.

Croma (C), tono o ángulo de hue (H) (Maskan, 2001) y el cambio total de color (ΔE) (Kowalski et al., 2016), se calcularon según:

$$C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$H = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

3.2.7 Índice de expansión

Se determinó midiendo el diámetro (mm) de los insuflados, para cada condición de proceso y luego dividiendo por el diámetro (mm) de granos sin expandir y en caso del extrusor el diámetro de la boquilla (Kowalski et al., 2016).

3.2.8 Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)

Estos parámetros se determinaron de acuerdo a Anderson et al. (1969). Los insuflados y extruidos se molieron usando un molino Udy Mill (Modelo 3010 - 060, UDY Corporation, Fort Collins, CO, EE.UU.) y se tamizó con tamiz de malla 60 (0,250 mm). Una porción de los productos triturados (2,5 g) se colocó a continuación en 30 mL de agua a 30°C y se mezcló intermitentemente durante 30 minutos. Las muestras se centrifugaron durante 10 minutos a 3000 × g (Damon IEC HN-SII; Damon, IEC Division, Needham, MA, EE.UU.). IAA se calculó como la relación entre la masa del precipitado y la masa del producto seco original. ISA se obtuvo al eliminar el sobrenadante y secar durante la noche a 70 °C. Los sólidos restantes se expresaron como porcentaje de masa de la muestra original. Los experimentos se realizaron por triplicado. Las ecuaciones utilizadas para los cálculos de IAA e ISA se muestran a continuación:

$$IAA = \frac{\text{Masa de la muestra precipitada (g)}}{\text{Masa de la muestra seca (g)}}$$

$$ISA = \frac{\text{Masa de la muestra seca del sobrenadante (g)}}{\text{Masa de la muestra seca (g)}} \times 100$$

3.2.9 Microscopía electrónica de barrido

La morfología y la microestructura de la materia prima y de los insuflados se determinaron utilizando un microscopio electrónico de barrido SEM (JOEL JSM-6380LV, JOEL Ltd., Akishima, Japón). Las muestras se prepararon mediante la colocación en un talón con cinta de carbono de doble cara y se recubrió con una capa delgada de oro utilizando un dispositivo de pulverización Sputter Coater SPI Supplies (USA), antes de la observación SEM. Se usó un potencial de aceleración de 20 kV durante la toma de las micrografías.

3.2.10 Propiedades mecánicas

Algunas propiedades mecánicas se determinaron mediante ensayos de compresión uniaxial sobre los insuflados y extruidos en posición de reposo, colocados entre dos superficies planas paralelas, utilizando la máquina de prueba universal INSTRON (ID 4467 H 1998, Instron Co, Norwood, MA, USA), de donde se obtuvieron datos de fuerza (kN) y deformación (mm). El número de muestras de insuflados (cañón expansor, extrusor y microondas) sometidos a las pruebas mecánicas fue de 15 unidades por tratamiento. Se midió la dureza, como la pendiente de la curva de deformación forzada por el método propuesto por Ramos Diaz et al. (2015), donde las muestras se colocaron perpendicularmente sobre un porta muestras (la distancia entre dos puntos de sujeción fue de 12 mm). La velocidad de la sonda de acero inoxidable fue de 5 mm/min, diámetro del vástago 3,25 mm.

La deformación corresponde a la distancia que desplaza el vástago desde el primer contacto con la superficie de la quinua hasta el punto “bioyield” correspondiente a la falla biológica. La resistencia del pericarpio es la fuerza en el punto “bioyield”, considerado también como fuerza de ruptura o fuerza máxima. La dureza es la energía total absorbida durante la penetración y es equivalente al área bajo la curva entre el primer contacto del vástago con la piel hasta el punto “bioyield” (eje horizontal) y la fuerza en el punto “bioyield” (eje vertical).

El módulo de elasticidad se determinó según la teoría de Hertz a través de tensiones de contacto entre dos cuerpos elásticos sujetos a compresión uniaxial (Mohsenin, 1986). De acuerdo a esta teoría, la deformación de un cuerpo en contacto con dos superficies planas paralelas está dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{0,338F(1 - \mu^2)}{D^{\frac{3}{2}}} \left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad (Pa);

F = Fuerza (N);

D = Deformación (m);

μ = Razón de Poisson (0,4);

R_1, R'_1, R_2, R'_2 = Radios de curvatura (m).

Asumiendo que las dos mitades de la quinua desde el lado son iguales, la ecuación anterior queda expresada como:

$$E = \frac{0,338F(1 - \mu^2)}{D^{\frac{3}{2}}} \left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} \right) \right]^{\frac{3}{2}}$$

Donde los radios de curvatura R_1 y R'_1 se definen como:

$$R_1 = \frac{X^2 + Z^2}{2Z}$$

$$R'_1 = \frac{Y^2 + Z^2}{2Z}$$

Donde:

X = Radio mayor del grano (m);

Y = Radio menor del grano (m);

Z = Espesor del grano (m).

3.2.11 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de la materia prima y los insuflados se determinaron mediante el análisis del comportamiento térmico utilizando un calorimétrico diferencial de barrido DSC (204 F1 Phoenix, NETZSCH - Gerätebau GmbH, Germany) bajo una atmósfera de nitrógeno. Las muestras se calentaron desde temperatura ambiente hasta 349°C a una velocidad de 10°C/min. La temperatura inicial (T_i), temperatura pico (T_p), temperatura final (T_f) y la entalpía de gelatinización (ΔH) se obtuvieron del termograma resultante (Ruales & Nair, 1994). La estabilidad térmica se evaluó mediante análisis termogravimétrico (209 F3 TG, NETZSCH NETZSCH - Gerätebau GmbH, Germany). Las muestras se calentaron desde temperatura ambiente hasta 595 °C a una velocidad de 10 °C/min bajo una atmósfera de nitrógeno. Los análisis de las muestras se realizaron por triplicado.

3.2.12 Propiedades químico nutricionales

Análisis de composición proximal

Se determinó el contenido de humedad, proteínas, grasas y cenizas por triplicado utilizando el método de la AOAC, con números de referencia 925.10, 920.87 (factor de conversión de 6,25), 923.05 y 293.03, respectivamente, como lo describe la Asociación Oficial de Químicos Analistas (AOAC, 1990). El contenido total de carbohidratos se calculó por diferencia como: 100 - (masa en gramos (proteínas + grasas + agua + cenizas) en 100 g de quinua). El contenido de proteínas, grasas, cenizas y carbohidratos se expresó en base materia seca (MS).

3.2.13 Digestibilidad *in vitro* de materia seca, orgánica y proteína

La digestibilidad de la materia orgánica se determinó por el método *in vitro* de Boisen & Fernández (1997) adaptado, que contempla tres etapas de incubación enzimática. En la primera etapa se introdujeron 0,5 g de producto triturado (< 1 mm) en un frasco cónico de 250 mL junto con una barra magnética y 25 mL de tampón de fosfato (0,1 M; pH 6,0) y enseguida fueron mezclados mediante agitación lenta (300 rpm). Luego, se agregaron 10 mL de 0,2 M HCl y se ajustó el pH a 2,0 con 1 M de HCl o 1 M de NaOH. A continuación, se adicionó 1 mL de una solución de pepsina,

recientemente preparada (25 mg de pepsina porcina, 2000 FIP-U/g, Merck S.A.). También se agregó 0,5 mL de cloranfenicol (0,5 g cloranfenicol/100 mL etanol, Sigma-Aldrich) para evitar el crecimiento bacteriano. Se selló el frasco con tapón de caucho y se agitó lentamente (110 rpm) a 39°C durante dos horas. Para la segunda etapa se agregaron 10 mL de tampón de fosfato (0,2 M; pH 6,8) y 5 mL de NaOH (0,6 M) a la mezcla. El pH se ajustó a 6,8 con 1 M HCl o 1 M NaOH. Luego, se introdujo 1 mL de solución de pancreatina (100 mg pancreatina porcina, grado IV, Sigma-Aldrich). Luego, se selló con un tapón de caucho y se incubó el frasco bajo agitación moderada (110 rpm) a 39°C durante 4 horas. En la tercera etapa se agregaron 10 mL de 0,2 M de EDTA. Luego se ajustó el pH a 4,8 con 30% de ácido acético. A continuación, se introdujo 0,5 mL de una mezcla multi-enzimática de arabinasa, celulasa, β -glucanasa, hemicelulasa, xilanasas y pectinasa (Viscozyme 120 L, 120 FBG/g, Novo-Nordisk) a la mezcla, homogeneizando la mezcla mediante agitación. Luego, se selló con un tapón de caucho y el frasco se incubó bajo agitación moderada (110 rpm) a 39°C durante 18 horas. Los residuos no digeridos se recuperaron mediante una unidad de filtración Fibertec System M, Tecator, con filtro de vidrio (diámetro de 3 cm; 40-90 μ m de poros) seco, y de masa conocida que contiene como ayudante de filtración 0,4 g Celite (545, Tecator, precalentado a 500°C durante 4 h). Toda la mezcla se introdujo al filtro con adición de agua. Después de varias etapas de lavado (3 minutos cada vez) con 2×10 mL de etanol (96%) y acetona (99,5%), respectivamente, se deshidrató el residuo no digerido a 130°C hasta masa constante (para obtener los valores de la digestibilidad de materia seca) y luego se calcinó a 500°C durante 4 horas. La digestibilidad *in vitro* de materia orgánica se calculó a partir de la diferencia entre materia orgánica en la muestra y del residuo no digerido con corrección de materia orgánica en el blanco. Para determinar la proteína se rescató las muestras digeridas, estas muestras se liofilizaron y trituraron en un mortero (octogonal mortal, agate pestle, 90 mm). Se pesaron 0,15 g de muestra en una porta muestra de aluminio, luego se analizó mediante la combustión de Dumas, utilizando un analizador LECO (LECO TruSpec NC, LECO Corporation, St. Joseph, MI, EE.UU.) y posteriormente se analizaron el total de nitrógeno (N) (factor de conversión de 6,25) (Etheridge et al., 1998).

3.2.14 Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue definido como un modelo completamente aleatorio, con tres tratamientos en triplicado para muestras insufladas con y sin recubrimiento. Se analizaron los datos del diseño experimental utilizando análisis de varianza (ANDEVA), empleando el software R (The R Project for Statistical Computing). Para analizar diferencias entre los tratamientos, se utilizó el test de Tukey con un 95% de confianza ($p < 0,05$).

3.3 Resultados y Discusión

3.3.1 Forma y tamaño

Forma

En la Figura 3.2 se presentan fotografías de granos como materia prima e insuflados en posición de reposo; en ellas se pueden distinguir diversos tejidos como pericarpio, endospermo, cotiledón, radícula y perisperma (Prego et al., 1998), irregulares en los granos indicados.

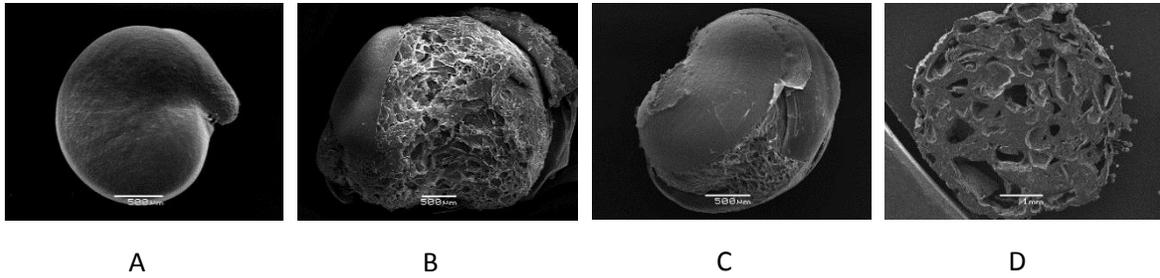


Figura 3.2. Microfotografías de granos de quinua: (A) materia prima, (B) cañón expansor, (C) microondas y (D) extrusor. Fuente: elaboración propia.

La forma de la materia prima y de insuflados en la posición de reposo se asemeja a un círculo con una ligera protuberancia hacia el exterior, la cual corresponde a la radícula (Figura 3.2 A, B, D). El extruido presenta una forma cilíndrica (Figura 3.2 C). La forma de los granos en la posición de reposo, corresponde a la de un prolato esferoide con una protuberancia hacia al exterior, la cual corresponde a la radícula (Mohsenin, 1986). Otros autores mencionan que los granos de quinua presentan formas redondas, aplanadas, cónicas, cilíndricas, elipsoidales y de disco (Ando et al., 2002; Vega-Gálvez et al., 2010).

La esfericidad, redondez, y tasa de redondez se calcularon a partir del trazado de los círculos inscritos y circunscritos en las fotografías de la materia prima y de insuflados (Apéndice 2), cuyos valores se presentan en el Apéndice 3.

El promedio de esfericidad (el valor de la esfericidad de un círculo es igual a 1,0), para granos de quinua es de 0,89, mientras para los insuflados por cañón expansor es 0,79, por extrusor 0,85 y por microondas 0,72 (Apéndice 3). Esto confirma cierta semejanza a la forma de un círculo cuando la materia prima es observada en posición de reposo. Por otro lado, los granos insuflados presentan diferencias significativas entre sí ($p < 0,05$), debido al proceso de inflado (Apéndice 3).

La tasa de redondez de la materia prima es 0,06, los insuflados por cañón expansor, extrusor y microondas presentaron valores de 0,21, 0,10, y 0,11, respectivamente (Apéndice 3). En el cálculo de la tasa de redondez interviene el diámetro del círculo inscrito correspondiente al ancho del grano. Los valores de la tasa de redondez son mayores para los insuflados por cañón expansor, y presentan diferencia significativa entre la materia prima y los insuflados (Apéndice 3).

La redondez es un parámetro que mide la agudeza de las esquinas de un sólido y que es igual a 1 para un círculo (sin esquinas). La redondez de la materia prima es igual a 0,56; la redondez de los granos insuflados mediante cañón expansor y microondas es igual a uno (Apéndice 3), porque la protuberancia (radícula) se eliminó durante el proceso de inflado. En los extruidos no se puede determinar este parámetro, debido a que su forma no se asemejó a un círculo.

Tamaño

Los granos enteros de materia prima y de insuflados de quinua fueron considerados como un producto elipsoide. La dimensión del diámetro mayor considera a la radícula y las alturas fueron determinadas a partir de las dimensiones del eje menor de la elipse; los extruidos fueron considerados como un cilindro. En la Tabla 3.2 se presentan las dimensiones de las muestras sin recubrimiento, y en la Tabla 3.2 se presentan los valores de las muestras con recubrimiento.

Tabla 3.1. Tamaño de granos de quinua (cruda) e insuflados sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Espesor (mm)	Diámetro geométrico (mm)
Materia prima	1,9 ± 0,20 ^a	1,8 ± 0,09 ^a	1,1 ± 0,21 ^a	1,6 ± 0,14 ^a
Cañón expansor	2,9 ± 0,40 ^c	3,7 ± 0,48 ^c	3,1 ± 0,32 ^c	3,2 ± 0,29 ^c
Extrusor	-	-	-	4,8 ± 0,18 ^d
Microondas	2,5 ± 0,30 ^b	2,5 ± 0,55 ^b	2,2 ± 0,78 ^b	2,4 ± 0,51 ^b

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

Tabla 3.2. Tamaño de granos de quinua (cruda) e insuflados con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Espesor (mm)	Diámetro geométrico (mm)
Materia prima	1,9 ± 0,14 ^a	2,0 ± 0,27 ^a	1,2 ± 0,22 ^a	1,7 ± 0,14 ^a
Cañón expansor	3,1 ± 0,30 ^c	3,8 ± 0,32 ^c	3,2 ± 0,35 ^c	3,3 ± 0,21 ^c
Extrusor	-	-	-	5,2 ± 0,57 ^d
Microondas	2,3 ± 0,72 ^b	2,3 ± 0,49 ^b	2,3 ± 1,04 ^b	2,2 ± 0,58 ^b

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

El promedio del diámetro mayor en granos de materia prima con y sin recubrimiento es igual a 1,9 mm, mientras que para los insuflados por microondas con y sin recubrimiento este valor oscila entre 2,3 a 2,5 mm, para el cañón expansor oscila entre 2,9 a 3,1 mm. Lo mismo ocurre para los diámetros menores y el espesor, donde los valores de los insuflados se duplican al someterse a tratamientos de inflado.

Según la NTP (2009), se considera la quinua como extra grande con un diámetro geométrico > 2,0 mm, grande de 1,70 hasta 2,0 mm, medianos de 1,40 hasta 1,69 mm y pequeños < 1,40 mm. La materia prima de este estudio es considerada de tamaño mediano como se muestra en la Tabla 3.1. Estos datos se encuentran en los rangos reportados por Vega-Gálvez et al. (2010), quienes indican que el diámetro que los granos de quinua pueden medir desde 1,5 hasta 4 mm de diámetro; también están en el rango de 1,4 a 1,6 mm de diámetro indicado por Vilches et al. (2003). El tamaño de inicial del grano está directamente relacionado con la cantidad de almidón, mientras mayor sea el contenido de almidón mayor es el índice de expansión (Ando et al., 2002; Prego et al., 1998).

3.3.2 Densidad

La densidad aparente es una medida útil que refleja la expansión de los insuflados en todas las direcciones y está directamente relacionada con el grado de inflado (Altan et al., 2009). Es un importante atributo de calidad que se monitorea de manera rutinaria para garantizar la calidad de los insuflados. Las densidades y porosidad de muestras insufladas sin recubrimiento se presentan en la Tabla 3.3 y con recubrimiento se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.3. Densidades y porosidad de insuflados de quinua sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Tratamiento	Densidad aparente (kg m ⁻³)	Densidad real (kg m ⁻³)	Porosidad
Materia prima	804 ± 7,46 ^d	1259 ± 20,36 ^d	0,36 ± 0,01 ^a
Cañón expansor	95,8 ± 3,16 ^a	218 ± 13,61 ^a	0,56 ± 0,04 ^b
Extrusor	237 ± 4,78 ^b	859 ± 37,57 ^b	0,72 ± 0,01 ^c
Microondas	475 ± 3,51 ^c	1039 ± 39,58 ^c	0,54 ± 0,01 ^b

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa (p < 0,05).

Tabla 3.4. Densidades y porosidad de insuflados de quinua con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Densidad aparente (kg m ⁻³)	Densidad real (kg m ⁻³)	Porosidad
Materia prima	691 ± 0,82 ^d	1264 ± 13,59 ^c	0,45 ± 0,01 ^a
Cañón expansor	107 ± 0,31 ^a	238 ± 21,99 ^a	0,55 ± 0,04 ^b
Extrusor	132 ± 1,53 ^b	286 ± 9,59 ^a	0,54 ± 0,02 ^b
Microondas	600 ± 16,20 ^c	1039 ± 39,6 ^b	0,42 ± 0,01 ^a

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa (p < 0,05).

Los valores de densidad aparente, real y porosidad en muestras sin recubrimiento oscilaron entre 95 – 804 kg m⁻³, 218 – 1259 kg m⁻³ y 0,36 – 0,72, respectivamente (Tabla 3.3); y para las muestras con recubrimiento oscilaron entre 107 – 691 kg m⁻³, 238 - 1264 kg m⁻³ y 0,42 – 0,55 (Tabla 3.4). Las densidades y porosidades presentaron diferencias estadísticamente significativas entre materia prima y los productos tratados térmicamente por cañón expansor, extrusor y horno de microondas. Las muestras tratadas con cañón expansor presentaron menores densidades seguidas por extrusor y luego por horno de microondas (Tabla 3.3 y 3.4). Esto indica un mayor grado de expansión, área superficial y mayor tamaño de cavidades dentro de la matriz polimérica para los productos tratados por cañón expansor. Los productos extruidos con recubrimiento presentaron densidades inferiores a los extruidos sin recubrimiento. Esto se debe probablemente al mayor contenido de proteína en el extruido con recubrimiento, que reduce el esfuerzo cortante del extrusor y a su vez disminuye la presión diferencial en el extremo del tornillo (Hood-Niefer & Tyler, 2010). Las interacciones entre proteínas y la formación de enlaces disulfuro intermoleculares entre proteínas hacen que la expansión aumente (Mahasukhonthachat et al., 2010; Nithaya et al., 2016). También la disminución de la densidad puede deberse a una disminución en la gelatinización del almidón (Suksomboon et al., 2011) y a la presencia de fibra (Brennan et al., 2008). El recubrimiento ayudó a la expansión de los extruidos (Tabla 3.4), para lo cual presentan una distribución uniforme de la fibra en la matriz del almidón que le permite expandirse y reducir la ruptura prematura de las células en extruidos (Guan et al., 2004). Se obtuvo un resultado similar con la adición de goma de fenogreco en harina de arroz (Ravindran et al., 2011), alginato de sodio y goma arábiga para producir arroz instantáneo (Wang et al., 2013). Las densidades de los productos extruidos fueron similares a las reportadas por Lee et al. (2000) y Lee et al. (2019). Por otro lado, la porosidad es una medida del espacio de poros abiertos dentro de la superficie de la muestra. Esta propiedad se correlaciona positivamente con la

manera en que un producto se expande. Las muestras procesadas con cañón expansor y extrusor presentaron una menor porosidad en comparación con los tratamientos de horno de microondas y materia prima no tratada, estos tratamientos (cañón expansor y extrusor) son potencialmente adecuados para la industria de insuflados.

3.3.3 Color

El color de productos insuflados evidencia un índice importante en la aceptación de los consumidores (Iwe et al., 2004). En gran medida se ve afectado por la composición de la matriz de alimentación y la condición del proceso utilizada en el inflado de los granos de quinua. Durante el proceso del inflado mediante cañón expansor, extrusor y horno de microondas pueden llevarse a cabo diversas reacciones que afectan el color del insuflado. Las reacciones más comunes son el pardeamiento no enzimático (por ejemplo, la reacción de Maillard y la caramelización) y la degradación de pigmentos (Ilo et al., 1999). La característica más significativa de las reacciones de pardeamiento no enzimático es la formación de compuestos coloreados que influyen en la apariencia del producto. En la Tabla 3.5 se presentan los valores de color de insuflados de quinua sin recubrimiento y en la Tabla 3.6 se presentan los resultados de las muestras con recubrimiento.

Tabla 3.5. Color de insuflados de quinua sin recubrimiento producidos mediante tres tratamientos térmicos. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Coordenadas colorimétricas					
	L*	a*	b*	C	H	ΔE
Materia Prima	24,9 ± 0,3 ^a	15,9 ± 0,6 ^c	14,5 ± 1,1 ^{bc}	21,5 ± 1,2 ^c	42,4 ± 1,2 ^a	-
Cañón expansor	42,1 ± 2,3 ^b	6,2 ± 0,3 ^a	16,3 ± 1,0 ^c	17,5 ± 1,1 ^b	69,1 ± 0,5 ^b	19,8 ± 1,9 ^b
Extrusor	43,6 ± 3,0 ^b	5,4 ± 0,4 ^a	12,6 ± 0,8 ^{ab}	13,7 ± 0,9 ^a	67,0 ± 0,6 ^b	21,6 ± 2,2 ^b
Microondas	34,1 ± 7,5 ^{ab}	10,3 ± 2,2 ^b	11,7 ± 1,3 ^a	15,7 ± 0,7 ^{ab}	49,0 ± 8,8 ^a	8,1 ± 1,4 ^a

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

Tabla 3.6. Color de insuflados de quinua con recubrimiento producidos mediante tres tratamientos térmicos. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Coordenadas colorimétricas					
	L*	a*	b*	C	H	ΔE
Materia prima	27,9 ± 1,2 ^a	12,7 ± 0,1 ^c	12,1 ± 0,9 ^a	17,6 ± 0,8 ^{ab}	43,5 ± 1,6 ^b	-
Cañón expansor	43,9 ± 1,1 ^b	7,5 ± 0,1 ^{ab}	18,3 ± 1,1 ^c	19,8 ± 0,1 ^b	67,7 ± 0,2 ^b	21,1 ± 1,1 ^b
Extrusor	47,1 ± 0,9 ^b	6,0 ± 0,2 ^a	13,9 ± 0,3 ^b	15,1 ± 0,4 ^a	66,7 ± 0,3 ^b	24,3 ± 1,1 ^b
Microondas	31,7 ± 8,8 ^a	11,5 ± 3,3 ^{bc}	12,1 ± 0,4 ^a	16,8 ± 2,0 ^a	47,2 ± 9,4 ^a	4,2 ± 0,9 ^a

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

El proceso de inflado por cañón expansor y extrusor presentó mayores valores de luminosidad (L*) (Tabla 3.5). Esto se debe a la degradación de pigmentos en los granos tratados de quinua o al desprendimiento del pericarpio del grano durante el proceso, y en consecuencia disminuyó el enrojecimiento (a*) respecto a la materia prima cruda y microondas; lo cual está influenciado por la expansión irregular del grano. La amarillez (b*) en el proceso por cañón expansor presentó el valor más alto en comparación con los insuflados con horno de microondas y extrusor. Esto puede ser una consecuencia de la degradación de pigmentos en los granos de quinua (Ilo et al., 1999). A mayor degradación del pericarpio la intensidad de color (C) disminuyó en los tratamientos por extrusor, cañón expansor y microondas. En el caso de las muestras con recubrimiento (Tabla 3.6),

los tratamientos con cañón expansor y extrusor presentaron valores mayores en luminosidad (L^*) y bajos en enrojecimiento (a^*) respecto al tratamiento por microondas esto debido a la expansión parcial o incompleta de los granos de quinua para este último. El tratamiento por cañón expansor presentó el mayor valor de amarillez (b^*); esto puede ser el resultado de la reacción de Maillard y de la degradación de pigmentos (Coutinho et al., 2013). Los procesos de cañón expansor y extrusor presentaron los más altos valores de diferencia de color respecto a la materia prima (Tabla 3.5 y 3.6). Esto debido a la expansión del grano y el desprendimiento del pericarpio.

3.3.4 Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)

El índice de absorción de agua (IAA) es una medida de la capacidad de retención de agua por parte de almidón en particular después de hincharse en exceso de agua (Rathod & Annapure, 2017). Este parámetro también es el indicador del comportamiento del producto insuflado durante su interacción con el agua y el grado de conversión del almidón (Alam et al., 2015), mientras que el índice de solubilidad en agua (ISA) es una medida de la degradación de moléculas de almidón durante el proceso de inflado con el aumento de la cantidad de compuestos solubles (Nithaya et al., 2016). La disponibilidad de grupos hidrofílicos influye en el IAA (Pardhi et al., 2019). Debido a la degradación del almidón, su capacidad de IAA disminuye (Guha et al., 1997). Los valores de IAA de productos insuflados sin recubrimiento oscilaron entre $1,91 \text{ g g}^{-1}$ y $5,27 \text{ g g}^{-1}$ (Tabla 3.7) y con recubrimiento oscilaron entre $4,36$ y $4,84 \text{ g g}^{-1}$ (Tabla 3.8).

Tabla 3.7. Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) en muestras insufladas de quinua sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	IAA (g/g)	ISA (%)
Materia prima	$1,91 \pm 0,45^a$	$10,7 \pm 2,5^a$
Cañón expansor	$3,45 \pm 0,02^b$	$40,4 \pm 0,5^c$
Extrusor	$5,27 \pm 0,16^c$	$22,8 \pm 0,2^b$
Microondas	$4,23 \pm 0,02^b$	$7,1 \pm 0,1^a$

Los datos se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

Tabla 3.8. Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) en muestras insufladas de quinua con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	IAA (g/g)	ISA (%)
Materia prima	$4,60 \pm 0,04^a$	$8,9 \pm 0,01^a$
Cañón expansor	$4,84 \pm 0,14^a$	$29,0 \pm 0,4^b$
Extrusor	$4,36 \pm 0,39^a$	$29,0 \pm 0,0^b$
Microondas	$4,11 \pm 0,01^a$	$8,3 \pm 0,1^a$

Los datos se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

Los insuflados sin recubrimiento presentaron diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), el proceso de extrusión generó la mayor capacidad de retención de agua de la quinua, seguido por microondas, cañón expansor y finalmente la materia prima cruda, pero las muestras con recubrimiento no presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los insuflados y materia prima. El incremento de IAA se debe a factores de temperatura y contenido de humedad y produce un calentamiento más uniforme, lo que finalmente incrementa la gelatinización del almidón (Gulati

et al., 2016). Además, se dice que la extrusión a baja humedad y altas temperaturas en el barril causa dextrinización sobre la gelatinización, lo que resulta en un IAA más bajo (Ding et al., 2006). Los resultados de ISA de insuflados sin recubrimiento oscilaron entre 7,1 y 40,4 % (Tabla 3.7) y las muestras con recubrimiento oscilaron entre 8,3 y 29 % (Tabla 3.8). Los insuflados procesados con cañón expansor presentaron la mayor degradación de moléculas de almidón, seguido por extrusor y microondas (Tabla 3.7); lo mismo ocurre con los insuflados con recubrimiento. El proceso de inflado por extrusión con recubrimiento generó una elevada degradación de almidón y como consecuencia presentó una mayor solubilidad en agua en comparación con los extruidos sin recubrimiento, pero lo contrario ocurre para los insuflados por cañón expansor. Los resultados son similares a los estudios realizados por Yousf et al. (2017) quienes evaluaron ISA de una mezcla de arroz y zanahoria extruida y observaron un incremento a bajas humedades debido a la plastificación por fusión y la expansión lateral del almidón.

3.3.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En la Figura 3.3, se muestran imágenes SEM de la sección superficial y transversal de los granos de quinua con y sin recubrimiento. Antes del tratamiento térmico los granos de quinua presentan una estructura externa lisa y homogénea, mientras que la estructura interna es compacta y relativamente homogénea (Figura 3.3).

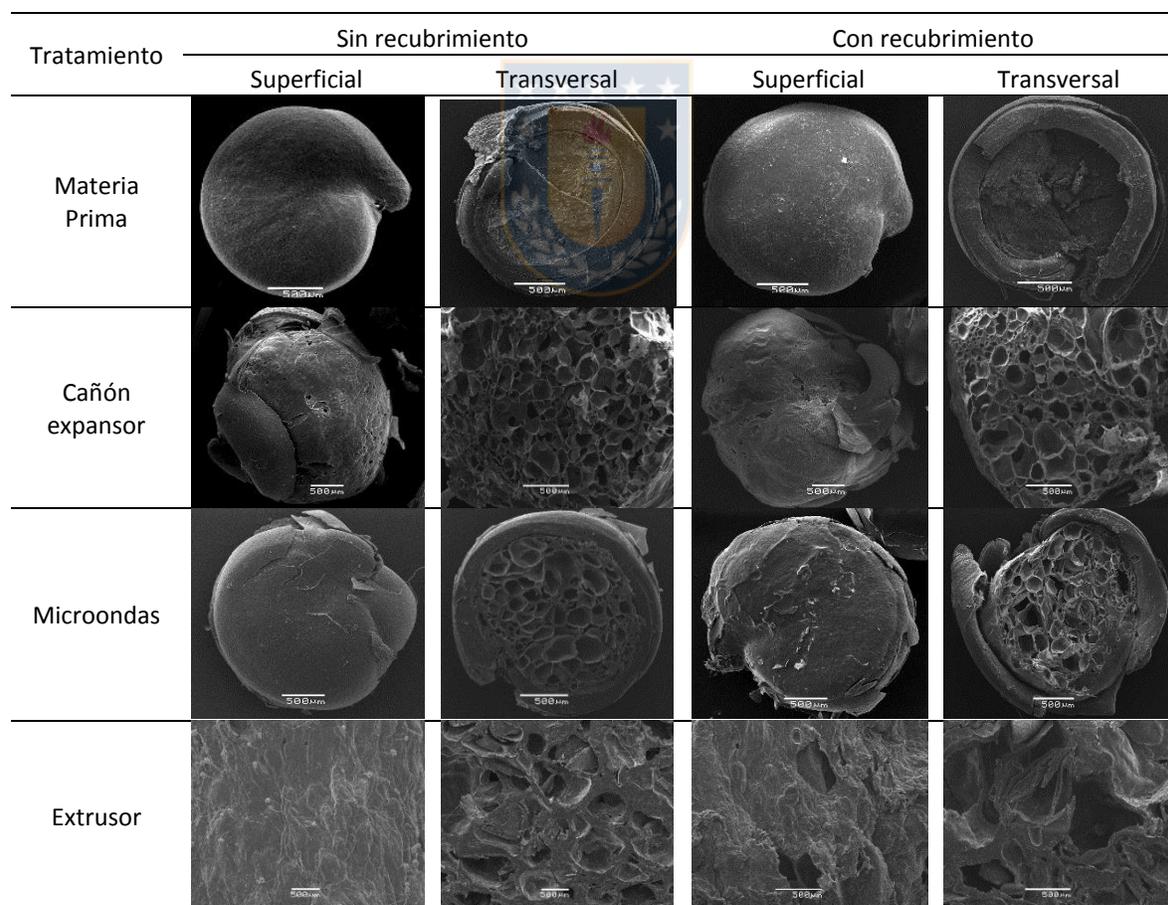


Figura 3.3. Microestructura de insuflados de quinua, Roja INIA, con y sin recubrimiento, procesadas mediante tres tratamientos térmicos. Fuente: elaboración propia.

El análisis de imágenes tomadas a través de microscopía electrónica de barrido, proporciona la distribución de tamaño de los gránulos y cavidades en la quinua, con y sin recubrimiento, y de las cavidades en los insuflados (Figura 3.3). El tamaño de los gránulos en la materia prima (cruda) oscila entre 0,69 y 1,49 μm , con formas poligonales, el tamaño de las cavidades de los insuflados osciló entre 51 - 350 μm (cañón expansor), 79 - 1100 μm (extrusor) y 50 - 400 μm (microondas) respectivamente (Apéndice 4). El grosor medio de la pared entre cavidades se encuentra en un rango de 0,81 - 55 μm ; las muestras tratadas con cañón expansor presentan tamaños de 0,81 μm , extrusor 149 μm y microondas 4,32 μm , respectivamente. Mientras para las muestras con recubrimiento el grosor de las paredes entre cavidades está entre 1,76, 50,1 y 5,69 μm para cañón expansor, extrusor y microondas, respectivamente (Apéndice 4). Los valores del grosor de las paredes son del mismo orden de magnitud encontrados por Warburton et al. (1990) y Trater et al. (2005), que corresponden al intervalo de 40 - 180 μm . Con respecto al tamaño de la cavidad, Warburton et al. (1990) y Trater et al. (2005) encontraron valores mayores que 0,8 mm. Esta diferencia con nuestros resultados puede impartirse a la diferencia en las técnicas de la toma de imágenes en el primer caso y al conjunto más amplio de condiciones de procesamiento. Por otro lado, las muestras con recubrimiento presentaron tamaños de cavidades que oscilan entre 39 - 380 μm (cañón expansor), 88 - 1250 μm (extrusor) y 64 - 372 μm (microondas), con formas octaédricas y poliédricas, respectivamente. Esto quiere decir, mientras mayor sea tamaño de las cavidades mayor es el índice de expansión e inversamente proporcional a la densidad.

3.3.6 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la materia prima y de insufladas sin recubrimiento se muestran en la Tabla 3.9 y con recubrimiento en la Tabla 3.10. La textura de los insuflados se asocia generalmente con la percepción sensorial de la dureza durante su masticación (Roudaut et al., 2002).

Tabla 3.9. Características de textura de materia prima y de insuflados sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Módulo de elasticidad (MPa)	Dureza (N mm)	Fuerza máxima (N)
Materia Prima	629 \pm 148 ^b	5,64 \pm 3,11 ^b	64,8 \pm 6,2 ^b
Microondas	26,9 \pm 8,9 ^a	0,43 \pm 0,04 ^a	6,14 \pm 1,4 ^a
Cañón expansor	17,1 \pm 6,9 ^a	0,71 \pm 0,16 ^a	3,15 \pm 0,29 ^a
Extrusor	23,8 \pm 11 ^a	0,61 \pm 0,2 ^a	4,88 \pm 0,9 ^a

Los datos se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

Tabla 3.10. Características de textura de materia prima y de insuflados con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Módulo de elasticidad (MPa)	Dureza (N mm)	Fuerza máxima (N)
Materia prima	821 \pm 13,7 ^b	3,27 \pm 1,74 ^c	53,6 \pm 11,1 ^b
Microondas	20,8 \pm 3,8 ^a	2,58 \pm 1,39 ^{bc}	3,84 \pm 0,29 ^a
Cañón expansor	19,8 \pm 5,3 ^a	0,88 \pm 0,6 ^{ab}	4,91 \pm 0,77 ^a
Extrusor	22,1 \pm 4,6 ^a	0,38 \pm 0,14 ^a	3,93 \pm 0,97 ^a

Los datos se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

La compresión de los insuflados induce al empaquetamiento de la estructura del grano crudo e insuflado. Las muestras insufladas con y sin recubrimiento presentaron una disminución de dureza y fuerza máxima (Tabla 3,10, 3,11) respecto a la materia prima. Estas variaciones se asocian con el índice expansión de los insuflados. Un comportamiento similar fue informado por Chanvrier et al. (2013) que demostraron que además de la porosidad, el contenido de proteínas aumentaba aún más la dureza en los insuflados. Además, teniendo en cuenta las principales propiedades de la microestructura de los insuflados, los productos con menor porosidad (materia prima) presentaron mayor fuerza y dureza. Correlacionándose positivamente con el tamaño de los poros de los insuflados.

Las condiciones de proceso y de recubrimiento tuvieron un impacto en el módulo de elasticidad. La materia prima, presentaron valores máximos entre 629 y 821 MPa. Los valores fueron similares a lo reportado por Medina (2001), mientras que los valores para los insuflados disminuyeron (microondas, 20 – 26 MPa; cañón expansor, 17 – 19 MPa; extrusor, 22,1 – 23,8 MPa). Estos resultados están relacionados con la compactación, el grosor de las paredes de los poros y el tamaño de los poros en la quinua cruda e insuflada.

3.3.7 Propiedades térmicas

Las curvas de termogravimetría (TG) y derivada termogravimetría (DTG) de quinua (cruda) e insuflados se presentan en la Figura 3.4 y 3.5, presentan formas sigmoidales, similares a almidones de otras fuentes (Pumacahua et al., 2016).

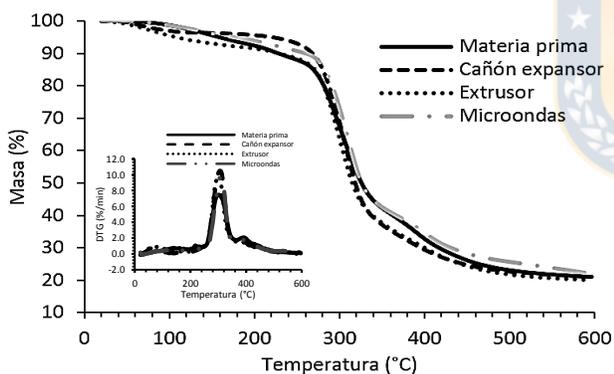


Figura 3.4. TG y DTG de materia prima e insuflados de quinua sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

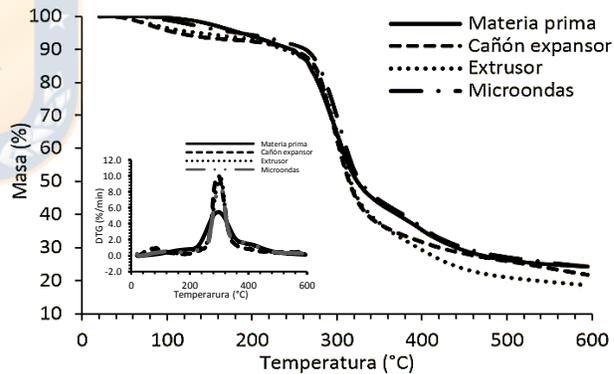


Figura 3.5. TG y DTG de materia prima e insuflados de quinua con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Estas curvas determinan la velocidad de degradación de la masa en función de la temperatura con tres pérdidas mayores de masa. La primera pérdida de masa osciló entre 21 – 260 °C y se debe a la pérdida de agua. En la segunda la pérdida osciló entre 280 – 530 °C con dos reacciones consecutivas que se atribuye a la descomposición y oxidación de materia orgánica (principalmente amilosa y amilopectina) con una pérdida de masa desde 89 a 24 %. En consecuencia, se produce una disminución inmediata de masa en un corto periodo de temperatura. La tercera parte osciló entre 530 – 600°C con la generación de un residuo final que se atribuye a la formación de cenizas y otros minerales (Tabla 3,11, 3,12). Estos valores de cambio de fases fueron superiores a las semillas de amaranto (Castro-Giráldez et al., 2012).

Las curvas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) (Figura 3.6 y 3.7) se llevaron a cabo para controlar el proceso de descomposición térmica de las muestras y mostrar eventos endotérmicos (deshidratación) o exotérmicos (descomposición de la materia orgánica) cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.11 y 3.12. Se calcularon la temperatura de inicio (T_o), la temperatura máxima (T_p) y la temperatura de conclusión (T_c), así como la entalpía de gelatinización (ΔH) de los picos principales.

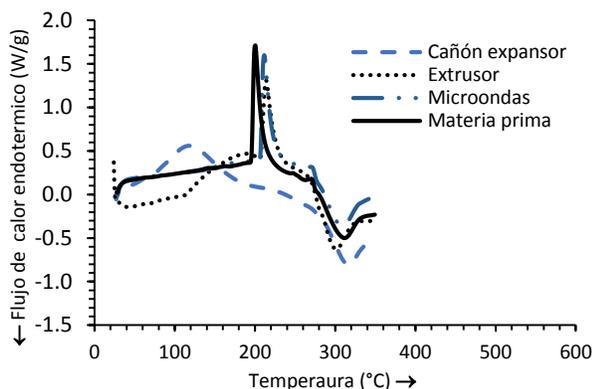


Figura 3.6. DSC de materia prima e insuflados de quinua sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

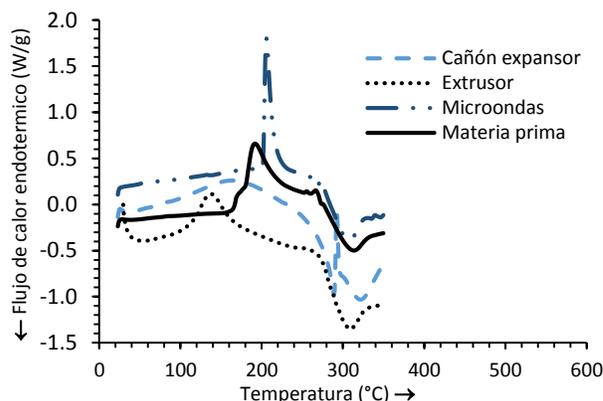


Figura 3.7. DSC de materia prima e insuflados de quinua con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.11. Resultados de TG/DTG, DSC de quinua (materia cruda) e insuflados de quinua sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	Paso	TG	DTG		DSC			
		Pérdida de masa (%)	ΔT (°C)	T_p (°C)	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)
Materia prima	1 ^{ro}	16,01	21 – 256	217	194	200	225	53
	2 ^{do}	60,75	256 – 366	302	280	312	337	-69
	3 ^{ro}	23,24	366 – 596	392	-	-	-	-
Cañón expansor	1 ^{ro}	8,77	21 – 150	65	74	119	155	134
	2 ^{do}	72,08	250 - 355	310	284	319	348	-79
	3 ^{ro}	19,16	355 – 295	400	-	-	-	-
Extrusor	1 ^{ro}	15,82	21 – 260	70	206	215	238	57
	2 ^{do}	62,17	260 – 350	305	286	301	324	-40
	3 ^{ro}	22,01	350 – 595	390	-	-	-	-
Microondas	1 ^{ro}	12,85	21 – 260	135	206	212	235	67
	2 ^{do}	60,92	260 – 350	305	237	310	330	-103
	3 ^{ro}	26,24	350 - 595	405	-	-	-	-

Tabla 3.12. Resultados de TG/DTG, DSC de quinua (materia cruda) e insuflados de quinua con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestras	TG		DTG		DSC			
	Paso	Pérdida de masa (%)	ΔT (°C)	T_p (°C)	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)
Materia prima	1 ^{ro}	10,72	21 – 230	85	180	192	224	59
	2 ^{do}	42,50	230 – 370	300	277	313	333	-72
	3 ^{ro}	10,28	370 – 595	405	-	-	-	-
Cañón expansor	1 ^{ro}	14,07	21 – 255	85	90	163	222	116
	2 ^{do}	66,40	255 – 350	300	304	323	346	-36
	3 ^{ro}	19,52	350 – 595	405	-	-	-	-
Extrusor	1 ^{ro}	14,83	21 – 255	225	111	139	161	58
	2 ^{do}	64,49	255 – 360	305	272	310	331	-144
	3 ^{ro}	16,80	360 – 595	400	-	-	-	-
Microondas	1 ^{ro}	12,11	21 – 255	130	201	205	233	64
	2 ^{do}	62,50	255 – 355	305	274	306	326	-88
	3 ^{ro}	25,38	355 - 595	400	-	-	-	-

La gelatinización de macromoléculas en granos enteros de la quinua se muestra a través de Figura 3.6 y 3.7, Tabla 3.11 y 3.12, respectivamente. Las muestras presentan curvas endotérmicas y exotérmicas. La primera parece depender de la pérdida de cristalinidad de los gránulos de almidón y además puede relacionarse con la formación del complejo de amilosa – lípido (Czuchajowska et al., 1998). Las entalpías de gelatinización oscilaron entre 57 y 134 J g⁻¹ y las temperaturas entre 119 y 215 °C en muestras sin recubrimiento y entre 58 y 116 J g⁻¹ y 139 y 205 °C en muestras con recubrimiento, respectivamente. La materia prima sin recubrimiento presenta valores de 69 J g⁻¹ y la materia prima con recubrimiento presenta 72 J g⁻¹. Esto indica que el recubrimiento tiene solamente un leve efecto en la entalpía de gelatinización; en consecuencia, las muestras con recubrimiento requieren un poco más de energía térmica para gelatinizar los polímeros. Los resultados obtenidos en este estudio presentaron temperaturas y entalpías totalmente diferentes a las de almidón puro de quinua que corresponden a entalpías de gelatinización de 1,66, 6,9 y 10,3 J g⁻¹ y temperaturas de gelatinización de 64,5, 62,3, 62,6 °C (Tang et al., 2002). De igual forma, el almidón puro de amaranto presentó valores de 2,58 y 10,6 J g⁻¹ y 74,5 y 74,9 °C para la entalpía y temperatura de gelatinización, respectivamente (Qian & Kuhn, 1999). La diferencia entre los valores de entalpía y temperatura de gelatinización se debe a la matriz compleja y a los tratamientos térmicos aplicados a la quinua. Atwell et al. (1983) determinaron la temperatura de gelatinización con DSC para almidón de quinua (37,2°C) y para proteínas aisladas de la quinua que varió entre 96 y 102 °C (Ruiz et al., 2016). La diferencia entre los valores de entalpía y temperatura puede atribuirse a la asociación entre los diferentes componentes de la quinua cruda e insuflados como almidón, proteína y minerales (Murray et al., 1985) y condiciones de proceso térmico.

3.3.8 Análisis proximal

Los resultados con respecto a la composición proximal de quinua tratada con cañón expansor, extrusor y microondas se presentan en la Tabla 3.13 y 3.14.

Tabla 3.13. Valor nutricional (g/100 g MS) de insuflados de quinua sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestra	Humedad	Ceniza	Grasa	Proteína	Carbohidratos
Materia Prima	7,12 ± 0,01 ^b	2,40 ± 0,01 ^c	6,41 ± 0,14 ^b	12,89 ± 0,10 ^b	78,30 ± 0,04 ^a
Cañón expansor	6,99 ± 0,21 ^b	2,21 ± 0,02 ^a	6,07 ± 0,13 ^b	12,07 ± 0,08 ^a	79,66 ± 0,19 ^b
Extrusor	10,67 ± 0,14 ^c	2,32 ± 0,01 ^b	3,35 ± 0,03 ^a	12,89 ± 0,07 ^b	81,44 ± 0,10 ^c
Microondas	5,17 ± 0,06 ^a	2,37 ± 0,01 ^c	6,37 ± 0,11 ^b	12,91 ± 0,06 ^b	78,35 ± 0,17 ^a

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

Tabla 3.14. Valor nutricional (g/100 g MS) de insuflados de quinua con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestra	Humedad	Ceniza	Grasa	Proteína	Carbohidratos
Materia Prima	8,34 ± 0,03 ^d	2,27 ± 0,01 ^b	4,11 ± 0,01 ^a	13,22 ± 0,03 ^c	80,40 ± 0,01 ^b
Cañón expansor	7,08 ± 0,05 ^b	2,00 ± 0,02 ^a	5,13 ± 0,10 ^b	11,06 ± 0,11 ^a	81,81 ± 0,20 ^c
Extrusor	7,99 ± 0,05 ^c	2,26 ± 0,01 ^b	4,03 ± 0,01 ^a	13,28 ± 0,05 ^c	80,43 ± 0,07 ^b
Microondas	6,51 ± 0,04 ^a	2,33 ± 0,01 ^c	5,46 ± 0,34 ^b	12,57 ± 0,22 ^b	79,65 ± 0,12 ^a

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, los carbohidratos son el principal macronutriente, seguido de proteínas, grasas y cenizas (Tabla 3.13 y 3.14). La humedad mostró valores entre 6,51 y 10,67 g/100 g MS con diferencia significativa entre los tratamientos térmicos. El contenido de carbohidratos fluctuó entre 78,3 y 81,8 g/100 g MS. Por otro lado, el contenido de proteína osciló entre 11 y 13 g/100 g MS, donde los granos sometidos al cañón expansor tuvieron el valor más bajo. El contenido de grasa osciló entre 3,4 – 6,4 g/100 g MS; los tratamientos por microondas y cañón expansor no fueron estadísticamente diferentes, mientras que el tratamiento por extrusor presentó diferencia significativa respecto a los tratamientos antes mencionados. El contenido de ceniza osciló entre 2,21 y 2,40 g/100 g MS, presentando la menor cantidad el producto procesado por cañón expansor, esto debido al mayor desprendimiento del pericarpio (cáscara) de los granos de quinua. Los macronutrientes de la quinua han llamado mucho la atención y han impulsado la búsqueda de valor agregado para los granos de quinua, evitando la pérdida de las propiedades nutricionales. Encina-Zelada et al. (2017) estudiaron la composición de muestras de quinua mediante espectroscopía de infrarrojo cercano y sus resultados fueron, en general, similares a los resultados obtenidos en el presente estudio. Con respecto a la grasa, ceniza, carbohidratos y humedad, los contenidos fueron 6,54, 3,13, 84,5 y 10,55 g/ 100 g MS, respectivamente, mientras para el contenido de proteína los autores obtuvieron valores más bajos (9,88 g/100 g MS). Lo mismo sucedió en los estudios realizados por Repo-Carrasco-Valencia et al. (2010), donde se estudió la composición de la quinua a través de las mismas metodologías usadas en el presente estudio. Dicha variación en el valor nutricional no es inesperada, y puede explicarse no solo por las diferentes variedades de quinua, sino también por factores agronómicos que varían como la concentración de minerales en el suelo del cultivo y la aplicación de fertilizantes (Nowak et al., 2016). Lo cual, puede explicarse por las diferencias geográficas donde se cultivaron las muestras de quinua, dado que los factores ambientales tienen una gran influencia en la composición química y nutricional de las especies vegetales (Chappell et al., 2017).

3.3.9 Digestibilidad *in vitro* de materia seca, orgánica y proteína

La calidad de un alimento depende de la biodisponibilidad de macro y micronutrientes en el sistema digestivo. En la Tabla 3.15 y 3.16 se presentan los valores de la digestibilidad *in vitro* de materia seca (DMS), materia orgánica (DMO) y proteína (DP).

Tabla 3.15. Digestibilidad *in vitro* de insuflados de quinua sin recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestra	DMS (%)	DMO (%)	DP (%)
Materia prima	86,1±1,9 ^a	81,3±1,8 ^a	23,67 ± 0,03 ^a
Cañón expansor	88,6±2,9 ^a	83,3±3,6 ^a	93,37 ± 0,03 ^d
Extrusor	88,0±1,9 ^a	84,0±0,6 ^a	87,16 ± 0,03 ^c
Microondas	86,9±1,6 ^a	83,0±1,1 ^a	50,17 ± 0,03 ^b

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

Tabla 3.16. Digestibilidad *in vitro* de insuflados de quinua con recubrimiento. Fuente: elaboración propia.

Muestra	DMS (%)	DMO (%)	DP (%)
Cañón expansor	91,1±1,5 ^c	88,0±0,4 ^b	90,65 ± 0,03 ^c
Extrusor	87,9±1,4 ^b	84,2±0,3 ^{ab}	79,20 ± 0,03 ^b
Microondas	80,7±1,0 ^a	79,8±3,9 ^a	38,47 ± 0,03 ^a

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

La digestibilidad más alta de materia seca en los productos insuflados se dio en los procesos utilizando el cañón expansor (88 – 91 %) y la más baja en los procesos con el horno de microondas (81-87%). La presencia de almidón parcialmente gelatinizado y de fibras disminuyó la digestibilidad gástrica *in vitro* de proteínas (Breier et al., 1982). Para los insuflados sin recubrimiento no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) (Tabla 3.15), pero los insuflados con recubrimiento presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) (Tabla 3.16). El proceso de expansión por cañón presenta un alto valor de digestibilidad de materia orgánica, ya que las condiciones severas de tratamiento térmico provoquen la ruptura de los enlaces covalentes de hidrógeno y la gelatinización del almidón (Parada et al., 2011; Rathod & Annapure, 2017). Mientras en el proceso de microondas existe una menor digestibilidad de materia orgánica, que puede ser por la presencia de complejos de amilosa-lípidos, complejos de almidón-proteína o almidón resistente (Eerlingen & Delcour, 1995). Los valores de la digestibilidad fueron similares a los snacks descritos por Arribas et al. (2017). Finalmente, tanto el cañón expansor como el extrusor permitieron generar un producto insuflado con una elevada digestibilidad proteica (79-93%), estos resultados fueron similares a lo reportado por Ruales & Nair (1994) junto con una baja pérdida de proteínas durante estos tratamientos según el análisis proximal (Tabla 3.13 y 3.14), lo cual los transforma en tecnología auspiciosa para producir snacks de quinua.

3.3.10. Conclusión

Los granos con recubrimiento permitieron obtener insuflados con buenas características físicas en los procesos por cañón expansor y extrusor. En este estudio demuestra que los insuflados de quinoa puede considerarse un cereal muy nutritivo. Tiene un contenido relativamente alto de proteínas de buena calidad y buena biodisponibilidad de materia orgánica de 83 – 84 % y proteína 79 – 93 %. Por lo tanto, estos productos proporcionan un nuevo ingrediente en la dieta alimentaria para poblaciones específicas con posibles beneficios para la salud.

3.3.11. Bibliografía

- Abugoch James, L. E. (2009). Chapter 1 Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Advances in Food and Nutrition Research*, 58, 1–31.
- Agza, B., Bekele, R., & Shiferaw, L. (2018). Quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.): As a potential ingredient of injera in Ethiopia. *Journal of Cereal Science*, 82, 170–174.
- Ahmed, J., & Ramaswamy, H. S. (2007). Microwave pasteurization and sterilization of foods. In: *Handbook of Food Preservation*. 2nd ed. Rahman, M. S. (Ed.). Florida, USA: CRC Press, 691–711.
- Alam, M. S., Kaur, M. J., Khaira, M. H., & Gupta, M. K. (2015). Extrusion and extruded products : Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters : A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 37–41.
- Altan, A., McCarthy, K. L., & Maskan, M. (2009). Effect of screw configuration and raw material on some properties of barley extrudates. *Journal of Food Engineering*, 92(4), 377–382.
- Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science and Technology*, 21(2), 106–113.
- Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., & Griffin, E. L. (1969). Roll and extrusion-cooking of grain sorghum grits. *Cereal Science Today*, 14(11), 372–376.
- Ando, H., Chen, Y.-C., Tang, H., Shimizu, M., Watanabe, K., & Mitsunaga, T. (2002). Food components in fractions of quinoa seed. *Food Science and Technology Research*, 8(1), 80–84.
- AOAC. (1990). Official Methods of Analysis of AOAC. *Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C.*, 15(1), 136–138.
- Arribas, C., Cabellos, B., Sánchez, C., Cuadrado, C., Guillamón, E., & Pedrosa, M. M. (2017). Impact of extrusion on nutritional composition, dietary fiber and *in vitro* digestibility of gluten-free snacks based on rice, pea and carob flours blends. *Food & Function*, 8(10), 3654–3663.
- Atares, L. (2013). Determinación de la densidad en líquido con el método del picnómetro. *Departamento de Tecnología de Alimentos, ETSIAMN, Universidad Politécnica de Valencia, España*, 5 p.
- Atwell, W. a., Patrick, B. M., Johnson, L. a., & Glass, R. W. (1983). Characterization of quinoa starch. *Cereal Chem.*, 60(1), 9–11.

- Aziz, A., Akram, N. A., & Ashraf, M. (2018). Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants under water deficit regimes. *Plant Physiology and Biochemistry*, *123*, 192–203.
- Babin, P., Della Valle, G., Dendievel, R., Lourdin, D., & Salvo, L. (2007). X-ray tomography study of the cellular structure of extruded starches and its relations with expansion phenomenon and foam mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, *68*(2), 329–340.
- Boisen, S., & Fernández, J. A. (1997). Prediction of the total tract digestibility of energy in feedstuffs and pig diets by in vitro analyses. *Animal Feed Science and Technology*, *68*(3–4), 277–286.
- Bojanic, A. (2011). Quinoa : An ancient crop to contribute to world food security. In *FAO* (Vol. 37th Confe, p. 54). Regional Office for Latin American and the Caribbean.
- Breier, C., Lisch, H. J., & Sailer, S. (1982). Effect of treatment on the concentration of lipoproteins and the postheparin-lipolytic activity in the plasma of noninsulin-dependent diabetics. *Klinische Wochenschrift*, *6*(11), 551-554.
- Brennan, M. A., Monro, J. A., & Brennan, C. S. (2008). Effect of inclusion of soluble and insoluble fibres into extruded breakfast cereal products made with reverse screw configuration. *International Journal of Food Science and Technology*, *43*(12), 2278–2288.
- Castro-Giráldez, M., Fito, P. J., Prieto, J. M., Andrés, A., & Fito, P. (2012). Study of the puffing process of amaranth seeds by dielectric spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, *110*(2), 298–304.
- Chanvrier, H., Jakubczyk, E., Gondek, E., & Gumy, J. (2014). Insights into the texture of extruded cereals: Structure and acoustic properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *24*, 61–68.
- Chappell, A., Scott, K. P., Griffiths, I. A., Cowan, A. A., Hawes, C., Wishart, J., & Martin, P. (2017). The agronomic performance and nutritional content of oat and barley varieties grown in a northern maritime environment depends on variety and growing conditions. *Journal of Cereal Science*, *74*, 1–10.
- Coutinho, L. S., Batista, J. E. R., Caliar, M., & Soares Junior, M. S. (2013). Optimization of extrusion variables for the production of snacks from by-products of rice and soybean. *Food Science and Technology*, *33*(4), 705–712.
- Czuchajowska, Z., Klamczynski, A., Paszczyńska, B., & Baik, B. (1998). Structure and functionality of barley starches. *Cereal Chemistry*, *75*(5), 747–754.
- De la Riva Tapia, D. F. (2010). Comparación del contenido de filatos, polifenoles y capacidad antioxidante de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) cruda y procesada, variedad Salcedo INIA. *Tesis para optar al Título de Ingeniero Agroindustrial*, Universidad Nacional Del Altiplano. Puno, Perú, 109 p.
- Ding, Q. B., 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.
- Eerlingen, R. C., & Delcour, J. A. (1995). Formation , analysis , structure and properties of type iii enzyme resistant starch. *Journal of Cereal Science*, *22*(2), 129–138.

- Encina-Zelada, C., Cadavez, V., Pereda, J., Gómez-Pando, L., Salvá-Ruíz, B., Teixeira, A., Ibañez, M., Gonzales-Barron, U. (2017). Estimation of composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) grains by Near-Infrared Transmission spectroscopy. *LWT - Food Science and Technology*, 79, 126–134.
- Erba, D., Hidalgo, A., Bresciani, J., & Brandolini, A. (2011). Environmental and genotypic influences on trace element and mineral concentrations in whole meal flour of einkorn (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*). *Journal of Cereal Science*, 54(2), 250–254.
- Etheridge, R. D., Pesti, G. M., & Foster, E. H. (1998). A comparison of nitrogen values obtained utilizing the Kjeldahl nitrogen and Dumas combustion methodologies (Leco CNS 2000) on samples typical of an animal nutrition analytical laboratory. *Animal Feed Science and Technology*, 73(1–2), 21–28.
- Farinazzi-Machado, F. M. V., Barbalho, S. M., Oshiiwa, M., Goulart, R., & Pessan Junior, O. (2012). Use of cereal bars with quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) to reduce risk factors related to cardiovascular diseases. *Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas*, 32(2), 239–244.
- Figura, L., & Teixeira, A. A. (2007). *Food Physics: Physical Properties - Measurement and Applications*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Guan, J., Fang, Q., & Hanna, M. A. (2004). Selected functional properties of extruded starch acetate and natural fibers foams. *Cereal Chemistry*, 81(2), 199–206.
- Guha, M., Zakiuddin, S., & Bhattacharyah, 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.
- Gulati, P., Weier, S. A., Santra, D., Subbiah, J., & Rose, D. J. (2016). Effects of feed moisture and extruder screw speed and temperature on physical characteristics and antioxidant activity of extruded proso millet (*Panicum miliaceum*) flour. *Food Science and Technology*, 51(1), 114–122.
- Hidalgo, A., & Brandolini, A. (2008). Protein, ash, lutein and tocopherols distribution in einkorn (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*) seed fractions. *Food Chemistry*, 107(1), 444–448.
- Holm, J., Björck, I., Asp, N. G., Sjöberg, L. B., & Lundquist, I. (1985). Starch availability in vitro and in vivo after flaking, steam-cooking and popping of wheat. *Journal of Cereal Science*, 3, 193–206.
- Hood-Niefer, S. D., & Tyler, R. T. (2010). Effect of protein, moisture content and barrel temperature on the physicochemical characteristics of pea flour extrudates. *Food Research International*, 43(2), 659–663.
- Hu, Y., Zhang, J., Zou, L., Fu, C., Li, P., & Zhao, G. (2017). Chemical characterization, antioxidant, immune-regulation and anticancer activities of a novel bioactive polysaccharide from *Chenopodium quinoa* seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 99, 622–629.
- Ilo, S., Liu, Y., & Berghofer, E. (1999). Extrusion Cooking of Rice Flour and Amaranth Blends. *LWT - Food Science and Technology*, 32(2), 79–88.
- INIA. (2015). Quínoa: Un súper alimento para Chile y el mundo. *Tierra Adentro*, 108 (Noviembre-Diciembre), 1-84.

- Iwe, M. O., Van Zuilichem, D. J., Stolp, W., & Ngoddy, P. O. (2004). Effect of extrusion cooking of soy-sweet potato mixtures on available lysine content and browning index of extrudates. *Journal of Food Engineering*, 62(2), 143–150.
- Kowalski, R. J., Medina-Meza, I. G., Thapa, B. B., Murphy, K. M., & Ganjyal, G. M. (2016). Extrusion processing characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) var. Cherry Vanilla. *Journal of Cereal Science*, 70(1), 91–98.
- Küster, I., & Vila, N. (2017). Health/Nutrition food claims and low-fat food purchase: Projected personality influence in young consumers. *Journal of Functional Foods*, 38 (part A), 66–76.
- Lee, E. Y., Lim, K. II, Lim, J., & Lim, S. (2000). Effects of gelatinization and moisture content of extruded starch pellets on morphology and physical properties of microwave-expanded products. *Cereal Chemistry*, 77(6), 769–773.
- Lee, H. J., Kim, S., Suh, H. J., & Ryu, D. (2019). Effects of explosive puffing process on the reduction of ochratoxin A in rice and oats. *Food Control*, 95, 334–338.
- Li, G., & Zhu, F. (2017). Amylopectin molecular structure in relation to physicochemical properties of quinoa starch. *Carbohydrate Polymers*, 164, 396–402.
- Li, G., & Zhu, F. (2018). Quinoa starch: Structures, properties, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 181(1), 851–861.
- López, D. N., Galante, M., Robson, M., Boeris, V., & Spelzini, D. (2018). Amaranth , quinoa and chia protein isolates : Physicochemical and structural properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 152–159.
- Mahasukhonthachat, K., Sopade, P. A., & Gidley, M. J. (2010). Kinetics of starch digestion in sorghum as affected by particle size. *Journal of Food Engineering*, 96(1), 18–28.
- Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 177–182.
- Medina, W. T. (2001). Determinación de las propiedades físicas, mecánicas y termales de dos variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
- Mohsenin, N. N. (1986). Physical properties of plant and animal materials. Structure, physical characteristics and mechanical properties. *New York : Gordon and Breach Science Publishers*, 31, 987.
- Murray, E. D., Arntfield, S. D., & Ismond, M. A. H. (1985). The influence of processing parameters on food protein functionality II. Factor affect thermal properties as analyzed by differential scanning calorimetry. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 18(2), 158–162.
- Navruz-Varli, S., & Sanlier, N. (2016). Nutritional and health benefits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Cereal Science*, 69, 371–376.
- Nithaya, D. J., Bosco, K. A. S., Saravanan, M., Mohan, R. J., & Alagusundaran, K. (2016). Optimization of process variables for extrusion of rice – Bengal gram blends. *Indian Journal of Scientific & Industrial Research*, 75, 108–114.

- Nowak, V., Du, J., & Charrondière, U. R. (2016). Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chemistry*, *193*, 47–54.
- NTP. (2009). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). Requisitos. Norma Técnica peruana. NTP 205.062. Comisión de Normalización y de Fiscalización de Barreras Comerciales No Arancelarios. INDECOPI. Lima, Perú.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), & la Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2017). *Panorama de la Seguridad Alimentaria y Nutricional en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile.
- Parada, J., Aguilera, J. M., & Brennan, C. (2011). Effect of guar gum content on some physical and nutritional properties of extruded products. *Journal of Food Engineering*, *103*(3), 324–332.
- Pardhi, S. D., Singh, B., Ahmad, G., & Dar, B. N. (2019). Evaluation of functional properties of extruded snacks developed from brown rice grits by using response surface methodology. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *18*(1), 7–16.
- Prego, I., Maldonado, S., & Otegui, M. (1998). Seed structure and localization of reserves in *Chenopodium quinoa*. *Annals of Botany*, *82*(4), 481–488.
- Pumacahua-Ramos, A., Gomez-Vieira, J. A., Telis-Romero, J., Villa-Véliz, H. A., & Lopes-Filho, J. F. (2016). Isotherms and isosteric heat of sorption of two varieties of Peruvian quinoa. *Scientia Agropecuaria*, *7*(4), 409–417.
- Qian, J. Y., & Kuhn, M. S. (1999). Characterization of *Amaranthus cruentus* and *Chenopodium quinoa* starch. *Starch/Stärke* *51*(4), 116–120.
- Ramos Diaz, J. M., Suuronen, J. P., Deegan, K. C., Serimaa, R., Tuorila, H., & Jouppila, K. (2015). Physical and sensory characteristics of corn-based extruded snacks containing amaranth, quinoa and kañiwa flour. *LWT - Food Science and Technology*, *64*, 1047–1056.
- Rathod, R. P., & Annapure, U. S. (2017). Physicochemical properties , protein and starch digestibility of lentil based noodle prepared by using extrusion processing. *LWT - Food Science and Technology*, *80*, 121–130.
- Ravindran, G., Carr, A., & Hardacre, A. (2011). A comparative study of the effects of three galactomannans on the functionality of extruded pea – rice blends. *Food Chemistry*, *124*(4), 1620–1626.
- Repo-Carrasco-Valencia, R. A.-M., & Serna, L. A. (2011). Quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.) as a source of dietary fiber and other functional components. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, *31*(1), 225–230.
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Hellström, J. K., Pihlava, J. M., & Mattila, P. H. (2010). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry*, *120*(1), 128–133.
- Roudaut, G., Dacremont, C., Vallés, B., Colas, B., & Meste, M. Le. (2002). Crispness : a critical review on sensory and material science approaches. *Trends in Food Science & Technology*, *13*(6-7), 217–227.

- Ruales, J., & Nair, B. M. (1994). Properties of starch and dietary fibre in raw and processed quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.) seeds. *Plant Foods for Human Nutrition*, *45*, 223–224.
- Ruales, J., & Nair, B. M. (1994). Effect of processing on in vitro digestibility of protein and starch in quinoa seeds. *International Journal of Food Science & Technology*, *29*(4), 449–456.
- Ruiz, G. A., Opazo-Navarrete, M., Meurs, M., Minor, M., Sala, G., van Boekel, M., Stieger, M., Janssen, A. E. M. (2016). Denaturation and in vitro gastric digestion of heat-treated quinoa protein isolates obtained at various extraction pH. *Food Biophysics*, *11*(2), 184–197.
- Suchowilska, E., & Wiwart, M. (2006). Multivariate analysis of image descriptors of common wheat (*Triticum aestivum*) and spelt (*T. spelta*) grain infected by *Fusarium culmorum*. *International Agrophysics*, *20*, 345–351.
- Suksomboon, A., Limroongreungrat, K., Sangnark, A., & Thititumjariya, K. (2011). Effect of extrusion conditions on the physicochemical properties of a snack made from purple rice (Hom Nil) and soybean flour blend. *International Journal of Food Science and Technology*, *46*(1), 201–208.
- Sumnu, G., & Sahin, S. (2005). Recent developments in microwave heating. In: *Emerging Technologies for Food Processing*, Sun, D. W. (Ed.), Academic Press, Elsevier. 419–444.
- Tang, H., Watanabe, K., & Mitsunaga, T. (2002). Characterization of storage starches from quinoa, barley and adzuki seeds. *Carbohydrate Polymers*, *49*(1), 13–22.
- Trater, A. M., Alavi, S., & Rizvi, S. S. H. (2005). Use of non-invasive X-ray microtomography for characterizing microstructure of extruded biopolymer foams. *Food Research International*, *38*(6), 709–719.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain : a review. *Journal Science Food Agriculture*, *90*, 2541–2547.
- Vilcacundo, R., Miralles, B., Carrillo, W., & Hernández-Ledesma, B. (2018). In vitro chemopreventive properties of peptides released from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) protein under simulated gastrointestinal digestion. *Food Research International*, *105*, 403–411.
- Vilche, C., Gely, M., & Santalla, E. (2003). Physical properties of quinoa seeds. *Biosystems Engineering*, *86*(1), 59–65.
- Wang, J. P., An, H. Z., Jin, Z. Y., Xie, Z. J., Zhuang, H. N., & Kim, J. M. (2013). Emulsifiers and thickeners on extrusion-cooked instant rice product. *Journal of Food Science and Technology*, *50*(4), 655–666.
- Warburton, S. C., Donald, A. M., & Smith, A. C. (1990). The deformation of brittle starch foams. *Journal of Materials Science*, *25*(9), 4001–4007.
- Waters, C. (2007). HPLC and UPLC[®] Amino acid analysis history of amino acid analysis. Waters, Milford, USA.
- Xu, E., Pan, X., Wu, Z., Long, J., Li, J., Xu, X., Jiao, A. (2016). Response surface methodology for evaluation and optimization of process parameter and antioxidant capacity of rice flour modified by enzymatic extrusion. *Food Chemistry*, *212*, 146–154.

Yousf, N., Nazir, F., Salim, R., Ahsan, H., & Sirwal, A. (2017). Water solubility index and water absorption index of extruded product from rice and carrot blend. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6), 2165–2168.

Zea Zea, C. (2011). Determinación biológica de la calidad proteica en harina de quinua extruida de la variedad negra collana. *Tesis para optar al Titulo de Ingeniero Agroindustrial, Universidad Nacional Del Altiplano. Puno, Perú*, 58 p.



Capítulo 4. Conclusiones

El recubrimiento compuesto por almidón de maíz, quitosano, sorbitol y ácido acético influyó positivamente en el índice de expansión densidad tamaño, color y propiedades mecánicas en los procesos por cañón expansor y microondas. El proceso por cañón expansor presenta menor consumo de energía, sin embargo, en el proceso por horno microondas con recubrimiento no se obtuvieron resultados esperados, para lo cual se requiere generar y estudiar otros tipos de recubrimientos con propiedades de conservar el agua dentro del grano antes de la expansión.

Los procesos a altas temperaturas y cortos tiempos como cañón expansor y extrusor presentaron insuflados de buena calidad, evitando la pérdida de las propiedades nutricionales y buena biodisponibilidad de materia orgánica y proteína en comparación con los insuflados tratados en horno microondas y materia cruda.

Finalmente podemos concluir que las propiedades de nutricionales de los insuflados de la quinua es una fuente prometedora para su uso en la dieta alimentaria, asimismo pueden ser de mucha importancia para las empresas dedicadas al rubro de snacks y también para futuras investigaciones.



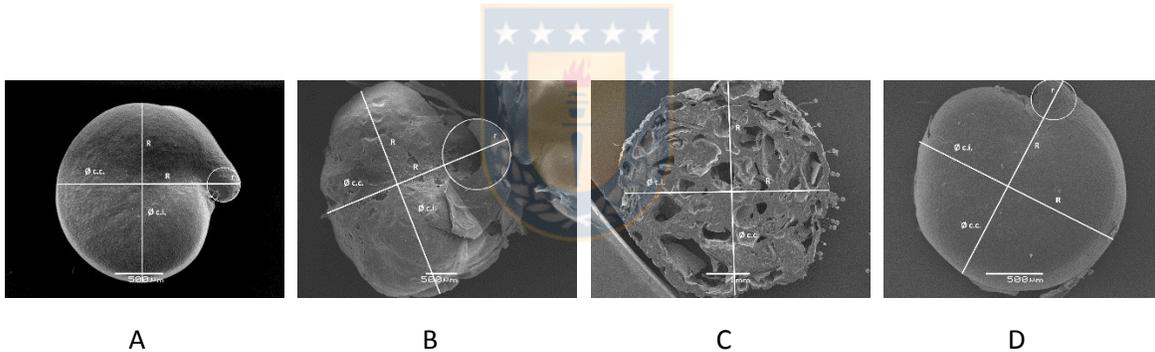
Apéndice

Apéndice 1. Características alveográficas de las muestras de harina de trigo y harina de quinua.
Fuente: elaboración propia.

Harina (trigo/quinua) (%)	P (mm)	L (mm)	W (10^{-4} J)	P/L
100/0	9,63	108,4	371	0,09
95/5	8,06	54,6	385	0,15
90/10	8,23	84,5	319	0,10
85/15	8,65	78,8	339	0,11
80/20	7,28	65,8	247	0,11
75/25	7,87	60,1	252	0,13
70/30	7,70	30,7	293	0,25

P: Sobrepresión máxima; L: abscisa media en la ruptura; P/L: relación de configuración de la curva;
W: energía de deformación de la masa.

Apéndice 2. Microfotografías de granos de quinua.



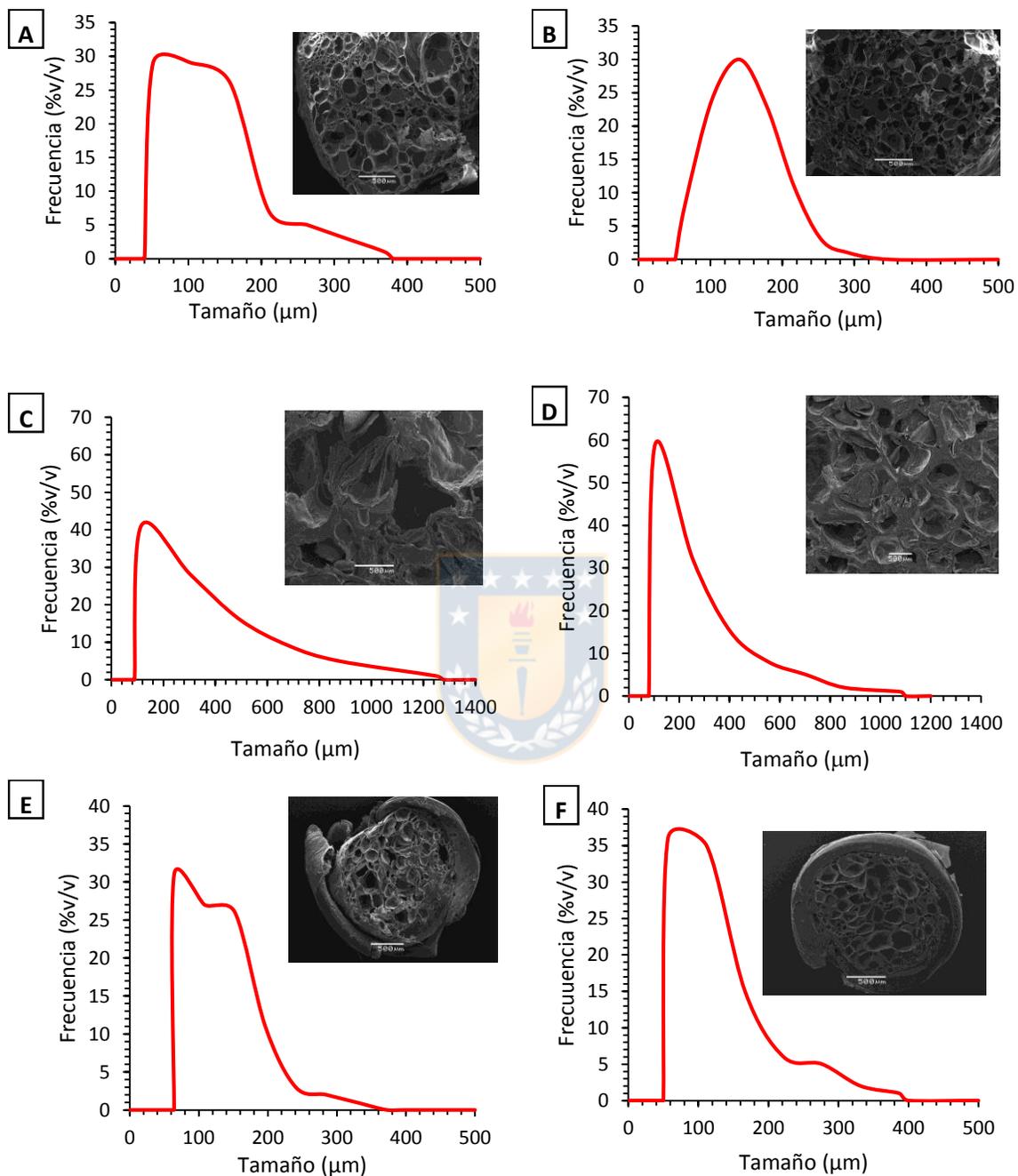
Microfotografías de granos de quinua: (A) materia prima, (B) cañón expansor, (C) extrusor y (D) microondas. Fuente: elaboración propia.

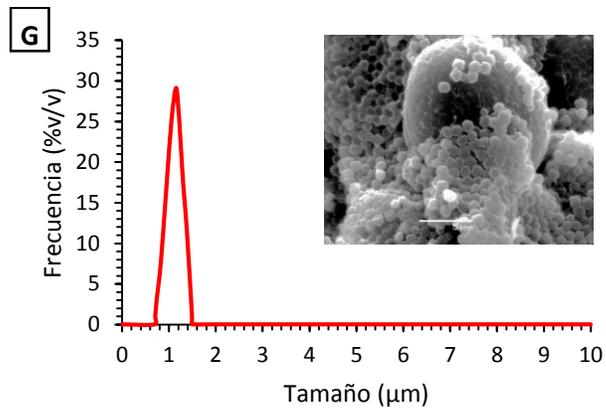
Apéndice 3. Forma de los granos crudos e insuflados de quinua. Fuente: elaboración propia.

Producto	Esfericidad	Tasa de redondez	Redondez
Materia prima	$0,89 \pm 0,03^d$	$0,06 \pm 0,00^a$	$0,56 \pm 0,01^a$
Cañón expansor	$0,79 \pm 0,01^b$	$0,21 \pm 0,02^d$	$1,00 \pm 0,01^b$
Extrusor	$0,85 \pm 0,05^c$	$0,10 \pm 0,00^b$	-
Microondas	$0,72 \pm 0,03^a$	$0,11 \pm 0,01^c$	$1,00 \pm 0,02^b$

Los datos se expresan como media \pm desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0,05$).

Apéndice 4. Curvas de distribución del tamaño de gránulos y cavidades de materia prima e insuflados de granos de quinua.





Cañón expansor con recubrimiento (A), cañón expansor sin recubrimiento (B), extrusor con recubrimiento (C), extrusor sin recubrimiento (D), microondas con recubrimiento (E), microondas sin recubrimiento (F), materia prima (G).

