

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**



**“EFECTO DE LAS VARIABLES DE PRESIÓN,
TEMPERATURA Y TIEMPO EN LA OBTENCIÓN DE
QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd)
COCIDA VARIEDAD DURA”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**PRESENTADA POR:
MAUDI NIVIA JANAMPA ARANGO**

**AYACUCHO – PERÚ
2017**

DEDICATORIA

Con eterno amor a Dios por ser mi guía
en el camino de la felicidad.

A mis padres y hermanos les brindo a
ustedes este esfuerzo, por su apoyo
incondicional y a todas aquellas personas
que hicieron posible la culminación de
esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, *Alma Mater*, forjadora de profesionales competentes y de calidad humana al servicio de la sociedad.

A la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, a la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias, a la plana docente, por su afán y paciencia en brindarme sus conocimientos y dejarme un ejemplo social humano que ayudarán en el desarrollo de mi vida profesional y personal.

Al Mg. Sc. Alberto Luis Huamaní Huamaní, docente de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la UNSCH, asesor del presente trabajo de investigación, por su apoyo y colaboración en el desarrollo del presente trabajo, materializado en este informe.

A todas las personas que de una u otra manera, colaboraron en la realización y conclusión del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	ii	
Agradecimientos	iii	
Indice general	iv	
Indice de figuras	vii	
Indice de tablas	ix	
Resumen	x	
INTRODUCCIÓN	1	
OBJETIVOS	3	
Objetivo General	3	
Objetivos Específicos	3	
 II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA		
2.1	EVOLUCIÓN EN EL CONSUMO DE GRANOS ENTEROS	4
2.2	CULTIVO DE LA QUINUA	7
2.2.1	Origen e importancia	7
2.2.2	Clasificación botánica	8
2.2.3	Estructura del grano	9
2.2.4	Orígenes	12
2.2.5	Consumo	13
2.2.6	Procesamiento y valor comercial	15
2.2.7	Clasificación taxonómica de la quinua	17
2.3	VALOR NUTRICIONAL	19
2.3.1	Proteína	20
2.3.2	Aminoácidos esenciales	22
2.3.3	Carbohidratos	26
2.3.4	Lípidos	27
2.3.5	Vitaminas	29
2.3.6	Minerales	30
2.3.7	Compuestos bioactivos y propiedades antioxidantes en quinua	30

2.3.8	Factores antinutricionales de la quinua	32
2.4	PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO	37
2.5	INDUSTRIALIZACIÓN DE LA QUINUA	39
2.6	CAMBIOS EN LOS COMPONENTES A PROCESOS DE PRESIONES Y TEMPERATURAS ELEVADAS	40
2.6.1	Cambios químicos en el almidón	42
2.6.2	Capacidad de hinchamiento	50
2.6.3	Índice de solubilidad o dispersibilidad en agua (ISA)	51
2.6.4	Índice de absorción de agua (IAA)	53
2.7	DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS	54
2.7.1	Fundamentos y mecanismos	54
2.8	TRANSFERENCIA DE MASA EN LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS	56
2.8.1	Difusión del agua durante el deshidratado de alimentos	56
2.8.2	Difusividad Efectiva	60
2.8.3	Modelos matemáticos en el deshidratado de alimentos	60
2.8.4	Enfoque no lineal del problema de transferencia de masa	62
2.9	MÉTODOS NUMÉRICOS	65
2.9.1	Estimación de la difusividad efectiva no lineal durante el secado de cuerpos geométricos regulares por el método de Alvarez y Legües.	65
2.10	REHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS DESHIDRATADOS	66
2.10.1	Factores que influyen sobre el proceso de rehidratación	69

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	LUGAR DE EJECUCIÓN	74
3.2	MATERIA PRIMA	74
3.3	REACTIVOS Y MATERIALES	74
3.4	EQUIPOS E INSTRUMENTOS	75
3.5	ENSAYO PRELIMINAR DE COCCIÓN	75
3.5.1	Prueba sensorial de cocción	75

3.6	DISEÑO EXPERIMENTAL	76
3.6.1	Diseño estadístico	76
3.7	MÉTODOS DE ANÁLISIS	78
3.7.1	Humedad según el método de la A.O.A.C.	78
3.7.2	Determinación del índice de solubilidad en agua (ISA)	78
3.7.3	Determinación de índice de absorción de agua (IAA)	79
3.8	CINÉTICA DE SECADO	79
3.9	MODELIZACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE SECADO	80
3.9.1	Modelos difusionales que no consideran la resistencia externa (SRE)	80
3.9.2	Evaluación estadística	82
3.10	Rehidratación	82

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1	RESULTADOS DE CALIDAD DE COCCIÓN: ÍNDICE DE SOLUBILIDAD DEL ALMIDÓN (ISA) Y EL ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA) DE QUINUA COCIDA DESHIDRATADA	83
4.1.1	Índice de Solubilidad en agua (ISA)	84
4.1.2	Índice de absorción de agua (IAA)	88
4.2	RESULTADOS DE CINÉTICA DE SECADO PARA QUINUA COCIDA DESHIDRATADA	92
4.2.1	Deshidratado de quinua cocida	92
4.2.2	Difusividad del agua	94
4.3	REHIDRATACIÓN	100

V. CONCLUSIONES	102
------------------------	-----

VI. RECOMENDACIONES	104
----------------------------	-----

VII. BIBLIOGRAFÍA	105
--------------------------	-----

	ÍNDICE DE FIGURAS	Pag.
2.1	Variedades de quinua	8
2.2	Grano de quinua	9
2.3	Sección longitudinal media del grano de quinua	10
2.4	Flujo de procesamiento de quinua, como los productos derivados.	15
2.5	Diversidad de coloración de grano de quinua	19
2.6	Estructura de los fitatos (ácido fítico)	35
2.7	Acción de la enzima fitasa	36
2.8	Rendimiento de producción de quinua por hectárea de Perú y Bolivia	39
2.9	Cambios en el almidón en un proceso de calentamiento acuoso	45
2.10	Cambio estructural en el almidón en un proceso de calentamiento acuoso	45
2.11	Curva típica de un almidón de cereal (50% sólidos) demostrando las distintas transiciones térmicas y los dominios estructurales en donde se presentan estas transiciones.	52
2.12	Modelo de adsorción de agua en un deshidratado alimenticio	69
3.1	Estadios de cocción de granos de quinua (prueba sensorial)	76
3.2	Diseño experimental para la obtención de quinua cocida deshidratada	77
4.1	Resultado del efecto de la presión de vapor saturado de cocción y tiempo en la solubilidad del almidón de quinua rosada de Juli y amarilla compuesta	85
4.2	Resultado del efecto de la presión de vapor saturado de cocción y tiempo en la solubilidad del almidón de quinua Ayrampo, Negra y Pasankalla.	86
4.3	Resultado del efecto de la presión de vapor saturado de cocción y tiempo, en el Índice de absorción de agua (IAA) del almidón en las variedades: Rosada de Juli (a), Amarilla Compuesta (b), Negra Ayrampo (c) Negra Ccollana (d) y Pasankalla(e).	90
4.4	Resultado la variación de humedad durante el deshidratado a	92

	velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en las variedades de quinua Rosada de Juli y Amarilla Compuesta.	
4.5	Resultado la variación de humedad durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en las variedades de quinua Negra Ayrampo y Negra Ccollana.	93
4.6	Resultado la variación de humedad durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, para la variedad de quinua Pasankalla.	93
4.7	Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en la variedad de quinua Rosada de Juli.	95
4.8	Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en la variedad de quinua Amarilla Compuesta.	96
4.9	Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en la variedad de quinua Negra Ayrampo.	96
4.10	Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, para la variedad de quinua Negra Ccollana.	97
4.11	Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, para la variedad de quinua Pasankalla.	97

	ÍNDICE DE TABLAS	Pág.
2.1	Exportaciones de granos de quinua de Bolivia y Perú	17
2.2	Composición proximal de fracciones de granos de quinua	21
2.3	Composición de aminoácidos esenciales en semillas de quinua	23
2.4	Composición de ácidos grasos esenciales en semillas de quinua	28
2.5	Composición de minerales en semillas de quinua	31
2.6	Contenidos en ácido fítico de algunos vegetales	35
2.7	Producción (miles de toneladas)	38
3.1	Valores máximos y mínimos de presión y tiempo de cocción de la quinua.	77
3.2	Diseño estadístico de estudio de las variables independientes.	78
4.1	Resultados obtenidos de las variables respuestas analizadas (ISA, IAA) por el diseño factorial.	84
4.2	Resultados de valores de difusividad efectiva para las variedades de quinua cocida durante la deshidratación con aire caliente.	98
4.3	Rehidratación de la quinua cocida deshidratada, en agua a ebullición	101

RESUMEN

En el presente trabajo, se desarrolló un producto como es la quinua cocida deshidratada, por el proceso de cocción en autoclave a alta presión y tiempo corto. La quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) es un pseudocereal de importante potencial agronómico y alto valor nutricional, presentando elevado contenido de proteína. Las materias primas en el estudio fueron las quinuas variedades Negra Ccollana, Negra Ayrampo, Pasankalla, Amarilla Compuesta, Rosada de Juli. Para verificar que variables influyen las propiedades del producto cocido deshidratado, fue realizado un diseño de superficie respuesta de factorial de 2^2 , cuyas variables independientes fueron (X_1) presión de vapor saturado en el autoclave; (X_2) tiempo de cocción aplicado. Las variables dependientes fueron: índice de solubilidad en agua (ISA); índice de absorción de agua (IAA). Como segundo objetivo fue determinar la cinética de deshidratación de quinua cocida, utilizando la metodología de Alvarez y Legues, a través de métodos numéricos de Newton Rapson. Los resultados fueron analizados por la metodología de superficie respuesta. Encontrándose efectos significativos para los niveles de presión de vapor del autoclave y tiempo en el proceso de cocción en las cinco variedades de quinua cocida deshidratada, para los valores de índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA). Los valores medios de difusividad efectiva identificados fueron: para la quinua Rosada de Juli ($5,13289 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), quinua Amarilla Compuesta ($5,23276 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), quinua Negra Ayrampu ($5,73395 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), quinua Negra Ccollana ($5,73395 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) y quinua Pasankalla ($10,48668 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$). La quinua cocida deshidratada presentó una rehidratación de 3 minutos aproximadamente en promedio en todas las variedades en estudio en agua a temperatura de ebullición, alcanzando una humedad promedio de 56 a 57% de humedad.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la demanda de quinua por su alto valor nutricional alcanza a 70000 toneladas/año. Esta demanda de quinua es sostenida por más de 51 países, donde el 90% está producido en la región Andina (FAO, 2011). Los principales productores de este grano a nivel internacional son: Bolivia, Perú, Ecuador, y Colombia.

La quinua por sus características nutricionales de este pseudocereal le tornan la materia deseable en la alimentación y nutrición humana, en mérito a su alto contenido proteico y composición de aminoácidos esenciales (similar a la leche) con contenidos próximos a lo recomendado por la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Los contenidos de vitaminas esencialmente “E” y riboflavina, asimismo como los minerales son relativamente elevados. Lípidos de buena calidad. Otra característica interesante es la ausencia de proteínas formadoras del gluten en su composición, siendo una buena alternativa en el desarrollo de alimentos para celíacos.

La presente tesis desarrolla una alternativa de practicidad al uso de la quinua, en la alimentación, permitiendo la obtención quinua cocida y deshidratada estabilizada en grano entero, un producto de fácil preparación y conservación, que tenga una mayor vida útil. En esta tesis se analiza el comportamiento de la cocción de las diferentes variedades de quinua dura a distintas presiones y tiempos, evaluados mediante el índice de solubilidad y el índice de absorción. Y durante la deshidratación, la difusividad juega un rol muy importante y por ser éste un parámetro que no se pueda medir experimentalmente en forma directa, es necesario desarrollar metodologías matemáticas teóricas, o semiteóricas, que permitan calcular su valor indirectamente, por ejemplo a través de curvas experimentales para el diseño de equipos de proceso. Este producto deshidratado requiere ser evaluado su calidad a través de la facilidad de rehidratación y vida útil como estabilidad en almacenamiento. En base a lo manifestado se planteó los siguientes objetivos:

Planteamiento del problema

En la actualidad en el mercado de Ayacucho y a nivel nacional, existen productos como leguminosas y cereales cocidos instantáneos frescos, tales como el garbanzo, frijol, haba, maíz, etc. que tienen demanda y que se comercializan en el mercado. Estos productos son muy perecibles y de vida útil corto. Frente a este problema de perecibilidad se plantea desarrollar un producto cocido deshidratado no perecible que tenga las mismas características de facilidad de uso. Cuggino (2008), manifiesta que en el desarrollo de distintos productos alimenticios a base de cereales y oleaginosas, existe la tendencia de presentarlos en estado cocido deshidratado, para su consumo directo o de fácil preparación. Actualmente con el

cambio de estilo de vida y hábitos alimentarios, la sociedad moderna cada vez más busca practicidad y conveniencia en el preparado de los alimentos y, al mismo tiempo requieren que los mismos sean saludables con excelencia en la calidad y de bajo costo, que beneficie a la mayoría de la población objetivo.

Formulación del problema

¿Es posible desarrollar un producto cocido deshidratado de quinua (*Chenopodium quinoa willd*)?

Objetivo general

Evaluar el efecto de las variables de presión, temperatura y tiempo en la obtención de quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) cocida deshidratada para las variedades duras.

Objetivos específicos

1. Explicar el efecto de las variables de proceso como: presión, temperatura y tiempo de cocción, en la calidad de cocción: índice de solubilidad del almidón (ISA) y el índice de absorción de agua (IAA) de la quinua cocido deshidratado, en las variedades Negra Ccollana, Negra Ayrampo, Pasankalla, Amarilla Compuesta, Rosada de Juli.
2. Determinar la cinética de deshidratación de quinua cocida, utilizando la metodología de Alvarez y Legues, a través de métodos numéricos.
3. Evaluar la calidad de rehidratación a través del tiempo de reconstitución en la quinua deshidratada.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 EVOLUCIÓN EN EL CONSUMO DE GRANOS ENTEROS

En las últimas décadas, importantes cambios socio-económicos en la mayoría de los países desarrollados han modificado sustancialmente los hábitos alimenticios hacia un aumento en el consumo de grasas y proteínas de origen animal, y un descenso en el nivel de la actividad física de la población. Esta tendencia se refleja en un aumento de la incidencia de enfermedades, directa o indirectamente, relacionadas con una dieta inadecuada. Particularmente, el incremento de la prevalencia de enfermedades asociadas al síndrome metabólico ha generado un continuo interés en el consumo de productos elaborados con granos enteros, como los cereales y las harinas integrales o con salvado, entre otros (Aleixandre y Miguel, 2008).

La rica composición de los granos enteros o sus fracciones, junto a su elevado contenido en fibra dietética, han motivado numerosas intervenciones nutricionales que se han centrado en destacar su potencial para obtener alimentos más saludables y nutritivos (Liu, 2007). Según diversos estudios científicos las dietas

ricas en alimentos con grano entero y otros alimentos de origen vegetal, y pobres en lípidos, como las grasas saturadas y el colesterol, pueden reducir el riesgo de padecer enfermedades coronarias, algunos tipos de cáncer y otras enfermedades crónicas. Tanto es así que en 1999 el consumo de grano entero comenzó a tener declaraciones de salud en los Estados Unidos, y más tarde, a partir de 2002 en Inglaterra y Suecia (Marquart y col., 2004). Estas declaraciones establecían una relación directa entre el consumo de granos enteros y la salud. A medida que las investigaciones demostraban los beneficios de los granos enteros, diferentes países y organizaciones de todo el mundo los incluían en sus recomendaciones dietéticas. En 2003, The Australian Dietary Guidelines for Children and Adolescents proponía el consumo de cereales como pan, arroz, pasta y fideos, pero preferiblemente procedentes de granos enteros. El Ministerio de Salud de México, en 2004, daba a conocer sus directrices en materia de salud alimentaria estableciendo que: "Se debe recomendar el consumo de cereales, de preferencia integrales o sus derivados. Además, se destacará su aporte de fibra dietética y energía". Posteriormente, en 2007, Canada's Food Guide recomendaba el consumo de al menos tres raciones al día de granos enteros como la cebada, el arroz, la avena e incluso pseudocereales como la quínoa y el amaranto. A partir de 2008 se unieron a estas recomendaciones países europeos como Dinamarca, Suiza, Suecia, Francia, Alemania, Holanda e Inglaterra (Whole Grains Council, 2011). En España, el Grupo de Revisión, Estudio y Posicionamiento de la Asociación Española de Dietistas-Nutricionistas también propone modificaciones en los hábitos alimentarios hacia un mayor consumo de cereales integrales y productos de grano entero (GREP-AEDN, 2011).

Hoy en día, después de más de una década desde aquella primera declaración saludable sobre el consumo de granos enteros en los Estados Unidos, la evidencia de los beneficios atribuidos a estos productos, lejos de perder importancia, no ha hecho más que fortalecerse. Uno de los recientes programas de la Unión Europea destinado a reducir el riesgo de padecer enfermedades relacionadas con el síndrome metabólico es el HEALTHGRAIN, cuyo objetivo es incrementar la ingesta de los compuestos bioactivos presentes en los granos enteros o en el salvado (Poutanen y col., 2010). Las actividades relacionadas con este proyecto creado en el año 2005, ahora son continuadas por la asociación HEALTHGRAIN Forum, fundada en Mayo del 2010. Por otra parte, en el informe elaborado por la American Association of Cereal Chemists International en la Cumbre Mundial sobre los cereales de grano entero en el año 2009, se planteaba una importante pregunta: “¿Debemos esforzarnos por alcanzar el 100% del grano entero en productos a base de cereales para el 10% de los consumidores o el 90% del grano entero para el 90% de los consumidores?”. Esta cuestión sugiere que la estrategia del todo o nada (harina integral o harina refinada) no es la más acertada.

También en los Estados Unidos, The Dietary Guidelines for Americans y el programa Healthy People 2020, destinado a promover comportamientos saludables en los americanos durante la próxima década, recomiendan el consumo de por lo menos tres porciones de granos enteros al día para reducir el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo-2 y algunos tipos de cáncer (USDA, 2005; IOM, 2011).

Los componentes de los cereales integrales que contribuyen a un perfil dietético más saludable son los hidratos de carbono complejos, minerales, vitaminas, antioxidantes y otros fitoquímicos. Pero además de estas sustancias bioactivas, uno de los principales aportes de los granos enteros es la fibra dietética (Slavin, 2004).

2.2 CULTIVO DE LA QUINUA

2.2.1 Origen e importancia

La quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) es un cultivo nativo de la región Andina. Estas zonas son consideradas como uno de los ocho centros de origen de las especies cultivadas de quinua. La mayoría de los investigadores coinciden en indicar que la quinua es originaria del altiplano que comparten Perú y Bolivia, ya que en dichas áreas se encuentra la mayor diversidad de plantas cultivadas y parientes silvestres (Gabriel *et al.*, 2012).

La quinua, del quechua kinúwa o kínua (*Chenopodium quinoa Willd*) es un pseudocereal perteneciente a la subfamilia *Chenopodioideae* de las amarantáceas. Es un cultivo que se produce en los Andes de Bolivia, Perú, Argentina, Chile, Colombia y Ecuador, así como en Estados Unidos. Bolivia es el primer productor mundial, seguido de Perú y Estados Unidos. Se denomina pseudo cereal porque no pertenece a la familia de las gramíneas que engloba los cereales "tradicionales", pero debido a su alto contenido de almidón su uso es el de un cereal (SESAN, 2013).

La palabra quinua proviene de la lengua quechua y significa “grano madre” (FAO, 2014). Hasta un periodo reciente, la quinua estuvo considerada únicamente como un alimento de los pueblos andinos, antes de ser mundialmente reconocida en la década de los 70, especialmente por los vegetarianos, en virtud de sus características dietéticas (Chevarria-Lazo *et al.*, 2014).



Figura 2.1: Variedades de quinua

2.2.2 Clasificación botánica

La quinua pertenece a la familia *Chenopodiaceae*, a la misma de otras plantas alimentarias y medicinales como la espinaca y la beterraga. El género *Chenopodium* se representa distribuido por el mundo, con varias especies, cerca de 250 identificadas. De esas, se destacan *C. quinoa*, *C. palidicaule* (de origen andina) y *C. berlandieri ssp. Nutaliae* (de origen mexicana) como pseudocereales de América (Spehar *et al.*, 2003).

Por la proximidad de la composición órgano-mineral al de los cereales, no en tanto sin pertenecer a la misma familia botánica, la quinua es frecuentemente referida como un “pseudocereal” (Spehar, 2002).

Los botánicos que han estudiado la taxonomía de la quinua están de acuerdo en considerar que se trata de una sola especie, no obstante de la amplia variación observada ya sea en el color de planta y grano, tipo de panoja, habito de crecimiento, etc. (Lescano, 1994).

Según Cronquist (1988 citado por Chambi, 2005) la clasificación taxonómica de la quinua corresponde a la sección *Chenopodia*, subseccion *Cellulata*, del genero *Chenopodium*, especie *Ch. quinoa Willd.* La diferencia se encuentra en el nombre común como quinua, quingua, dahue, suba, jupa, jura, etc.

2.2.3 Estructura del grano

El nombre quinua se aplica tanto a la planta como un grano, un fruto del tipo aquenio, que madura en cuanto la planta seca, permitiendo su cosecha mecanizada. Como se muestra en la Figura 2.2 es cilíndrico, forma plana y tamaño que varía de 2 a 2,5 mm de diámetro y 1,2 a 1,6 mm de ancho (Tapia, 1997; Spehar y Santos, 2003).



Figura 2.2: Grano de quinua

Presenta como principales estructuras anatómicas el pericarpio, el episperma (frente), el perisperma y el embrión (radícula y cotiledones), (Figura 2.3) y por lo tanto se considera la semejante. Su color es el resultado de combinar el color del pericarpio y episperma. El pericarpio puede ser translúcido, blanco, amarillo, rosa, rojo, naranja, marrón, gris o negro. Cuando se trata de los colores claros perisperma es de color blanco, frutas oscuras tienen episperma marrón o negro (Koziol, 1993; Prego *et al.*, 1998).

Sánchez (2013) describe al fruto de la quinua de forma en el perigonio, éste último recubre una sola semilla y se desprende con facilidad al frotarlo cuando está seco. Es un grano pequeño de forma oval con diámetro mayor de 2 a 3 mm y diámetro menor de 0,8 a 1,2 mm. La semilla está conformada por tres partes bien definidas (Figura 2.3).

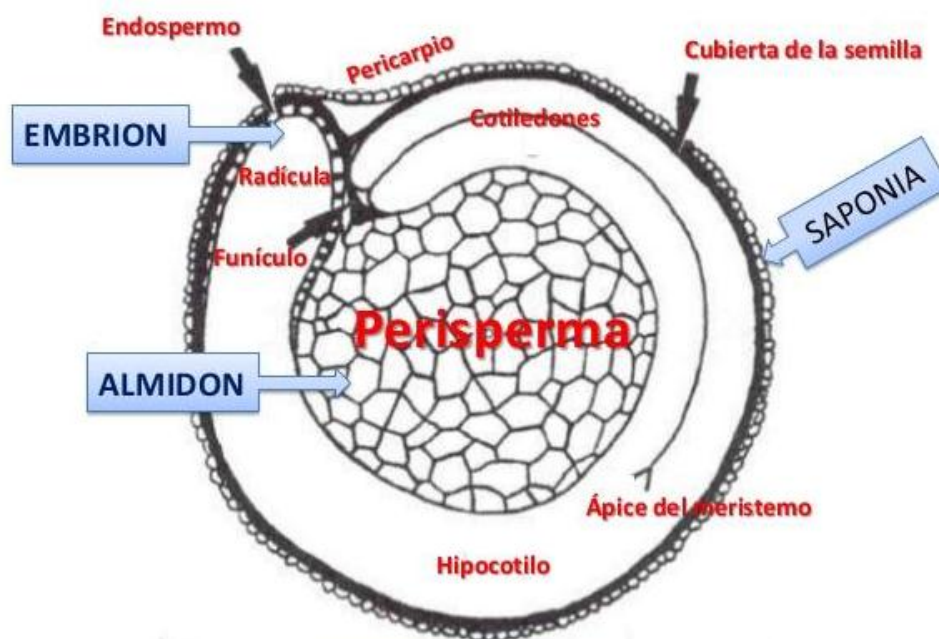


Figura 2.3: Sección longitudinal media del grano de quinua (Sánchez, 2013)

En granos sin procesar, el espesor del episperma varía desde 20 μm en la parte central de las caras hasta más de 100 μm en los extremos cerca del embrión, la capa más externa del episperma es la de mayor espesor (Quiroga-Ledezma y Escalera-Vásquez, 2010). Por su carácter de semilla amilácea y que botánicamente es asignada a la clase Dicotyledoneae se considera un pseudocereal o pseudograno y no un cereal (Shoenlechner *et al.*, 2005). Rojas y Pinto (2013) y Rojas *et al.* (2014) compilando información señalaron que los granos de quinua en madurez fisiológica expresan amplia diversidad de colores, entre ellos: blanco, crema, amarillo, anaranjado, rosado, rojo, púrpura, café claro, café oscuro, café verdoso, negro; y en la colección nacional de quinua de Bolivia se han caracterizado 66 colores de grano; en relación a la forma de grano de quinua, indican existen 4: lenticular, cilíndrica, elipsoidal y cónica, y que la variación del diámetro del grano varía desde 1,36 mm a 2,66 mm.

Constituye el fruto maduro sin el perigonio. Es de forma lenticular, elipsoidal, cónica o esferoidal, presenta tres partes bien definidas: episperma, embrión y perisperma. La episperma, está constituida por cuatro capas: Constituye el fruto maduro sin el perigonio. Es de forma lenticular, elipsoidal, cónica o esferoidal, presenta tres partes bien definidas: episperma, embrión y perisperma. La episperma, está constituida por cuatro capas: una externa de superficie rugosa, quebradiza, la cual se desprende fácilmente al frotarla. En ella se ubica la saponina que le da el sabor amargo al grano y cuya adherencia a la semilla es variable con los genotipos, tiene células de forma alargada con paredes rectas. La segunda capa es muy delgada y lisa, se observa sólo cuando la capa externa es

translúcida. La tercera es de coloración amarillenta, delgada y opaca y la cuarta, translúcida, está constituida por un solo estrato de células.

El embrión está formado por dos cotiledones y la radícula y constituye el 30% del volumen total de la semilla. Envuelve al perisperma como un anillo, con una curvatura de 320 grados, es de color amarillento mide 3.54 mm de longitud y 0.36 mm de ancho, en algunos casos alcanza una longitud de 8.2 mm de longitud y ocupa el 34% de toda la semilla y con cierta frecuencia se encuentran tres cotiledones. En forma excepcional a otras semillas, en ella se encuentra la mayor cantidad de proteína que alcanza del 35-40%, mientras que en el perisperma solo del 6.3 al 8.3 % de la proteína total del grano. La radícula muestra una pigmentación de color castaño oscuro.

El perisperma es el principal tejido de almacenamiento y está constituido mayormente por granos de almidón, es de color blanquecino y representa prácticamente el 60% de la superficie de la semilla. Sus células son grandes, de mayor tamaño que las del endosperma, de forma poligonal con paredes delgadas, rectas y con grandes agregados de almidón. Estos agregados están compuestos por miles de gránulos de almidón individuales de forma hexagonal en la mayoría de los casos (Mujica *et al.*, 2001).

2.2.4 Orígenes

En el estudio realizado por SESAN (2013), la quinua es oriunda de los andes peruanos y otros países sudamericanos. Según las investigaciones del historiador Max Uhle fue domesticada antes de los 5,000 A.C. de Cristo, basado en los

hallazgos arqueológicos que se produjeron en la ciudad peruana de Ayacucho. Debido a las propiedades nutricionales se convirtió junto con la papa y el maíz en el alimento básico de los pobladores pre inca e inca.

Fue tanta la importancia que tuvo para los incas, que en aquellos tiempos se celebraba una ceremonia especial, en la que el inca plantaba las primeras semillas de la temporada de siembra, y durante el solsticio los sacerdotes ofrecían vasijas de oro, llenas de quinua al Inti o Dios sol. Principales productores. El Perú es junto con Bolivia uno de los más grandes productores y exportadores de quinua. Los principales departamentos del Perú productores de quinua son Puno, Ayacucho, Cusco, Junín, Apurímac, Arequipa y Huancavelica.

Mucho tiempo fue clasificada como un cultivo de subsistencia, situación que explica la conservación de una diversidad de prácticas agrícolas tradicionales de las comunidades andinas, en razón de no poder integrarlas en un modelo de agricultura convencional; este modelo agroecológico es el que se impone también como el más idóneo en un medio ambiente frágil sometido a fuertes limitaciones abióticas (Chevarria-Lazo *et al.*, 2014);

2.2.5 Consumo

Aunque su uso se restringe a algunos países, y por otra parte, en algunas regiones, el potencial de la quinua como una fuente nutricional es alta. El interés en su uso es reconocido por organismos internacionales como la Organización para la Agricultura y la Alimentación / Mundial de la Salud (FAO / OMS) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) (DINI *et al.*,

2006; Comai *et al.*, 2007; Jancurová *et al.*, 2009), por ejemplo, lo que requiere el desarrollo de productos de calidad sensorial adecuada, como forma de viabilizar su incorporación a la alimentación humana.

Los factores que hacen atractiva la quinua en el sistema de producción son la composición del grano y la planta. Si tenemos en cuenta que la composición de aminoácidos esenciales es bastante similar a la caseína, no es sorprendente que los niños, después del destete, que comienzan a consumir en forma de gachas o las gachas, como hoy se percibe entre los residentes locales rural (Ascheri *et al.*, 2002).

El grano puede ser consumido de varias maneras: hervido en agua y después como ensalada; cocinado con especias, de manera similar a la del arroz; en sopas y salsas. El derivado de la harina de grano se puede utilizar en la alimentación infantil y la preparación de papillas, postres, panes enriquecidos, panqueques, galletas y bebidas (Spehar, 2006).

La falta de conocimiento de cómo preparar el grano y la falta de diversificación en el procesamiento industrial hacen que su consumo es mínimo, a pesar de sus buenas características de los alimentos. Los cambios estructurales en las materias primas derivadas de extrusión permiten el uso completo de este pseudocereal, que se adaptan a otras harinas comparación en términos de aminoácidos y minerales (Magallanes, 2009).

2.2.6 Procesamiento y valor comercial

En escala industrial, a partir de quinua se puede obtener por extrusión, productos tales como harina instantánea y expandidos ("snacks"). Además de estos productos, sustancias nutracéuticas, pueden obtenerse para el consumo humano. En cualquiera de los niveles de procesamiento, son usos para la planta. La Figura 2.5 resume la transformación, con las distintas etapas de procesamiento de la quinua en productos de mayor valor agregado. De este modo se establece el flujo de producción de este granifera (Spehar, 2006).

Los resultados de las posibles aplicaciones de este versátil pseudocereal son constantes, la industria alimentaria, los nuevos productos se están produciendo o extraídos, son: la "leche" (extracto) de la quinua, quinua tempeh (extracto de quinua fermentada), concentrados de proteínas y colorantes naturales (betalaínas para su uso en los productos alimenticios) (Brady *et al.*, 2007).

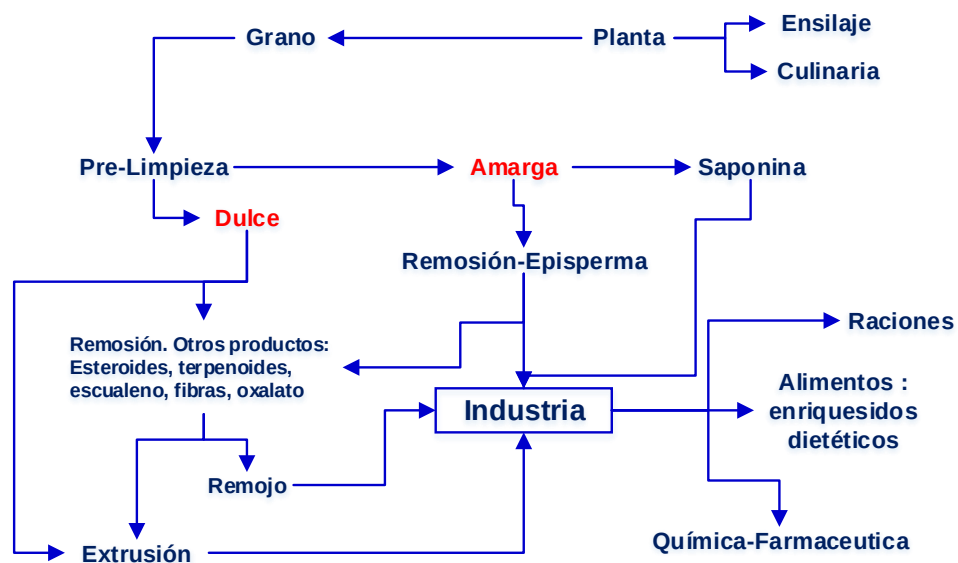


Figura 2.4. Flujo de procesamiento de quinua, como los productos derivados.

Fuente: Spehar *et al.*, (2003).

Comercialmente, este grano se puede encontrarse en formas enteras o pulidas, tales como harina, copos, aperitivos o bebidas expandido. Se puede comer cocido, de manera similar a la del arroz o en combinación con otros ingredientes en diversas preparaciones alimenticias, sopas, salsas, cereales de desayuno, entre otros (Borges *et al.*, 2003).

En la literatura hay muchos estudios sobre el uso de formulaciones de grano de quinua preparado para celíacos o para aumentar el valor nutricional de los productos tales como fideos (Borges *et al.*, 2003), galletas (Pagamunici *et al.*, 2013), pan (Calderelli *et al.*, 2010; Elgeti, 2014), barras de cereales (Degaspari *et al.*, 2010) y la torta (Silva *et al.*, 2010).

También se ha desarrollado nuevos productos con un atractivo funcional como cerveza (Bicudo *et al.*, 2012), copos de pre-gelatinizada (Degaspari y Silva, 2010), extruido (Taverna, Leonel y Mischán, 2012), entre otros.

La Tabla 2.1 ilustra las exportaciones de granos de quinua de Bolivia y del Perú en toneladas en los años 2010-2012.

Tabla 2.1 Exportaciones de granos de quinua de Bolivia y Perú

	Exportación del Perú (Toneladas)			Exportación de Bolivia (Tonelada)		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Mundial	4763	8020	10275	15519	20366	25899
Estados Unidos	2944	5039	6662	7720	10655	16342
Unión Europea	630	1135	1363	5486	5856	5550
Canadá	226	400	592	620	1339	1755
Argentina	18	22	20	244	300	261
Australia	133	320	446	257	496	553
Brasil	25	142	229	473	389	485
Chile	31	99	85	81	132	142
Israel	224	184	380	201	283	429
Japón	136	116	101	81	80	106
Nueva Zelanda	85	145	120	-	-	-

Fuente: FAO (2013 b)

La Tabla 2.1 muestra que las exportaciones de quinua crecieron en los años 2010 hasta 2012, siendo que el volumen de los granos a exportados de Bolivia y Perú prácticamente se duplicaron en dos años. Según la FAO (2013 b), los mayores importadores de quinua son los Estados Unidos y la Unión Europea, pero el consumo y las exportaciones a otros países de todo el mundo viene creciendo mucho en los últimos años debido principalmente a la popularidad de su alto valor nutritivo.

2.2.7 Clasificación taxonómica de la quinua

La amplia variabilidad genética de la quinua le permite adaptarse a diversos ambientes ecológicos (vallesinterandinos, altiplano, yungas, salares, nivel del

mar) con diferentes condiciones de humedad relativa, altitud (desde el nivel del mar hasta las 4.000 metros de altura) y es capaz de hacer frente a cambios de temperatura que oscilan entre -8° C hasta 38° C. Según información del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) existen alrededor de 100 cultivares de quinua. En el Perú hay 3 mil ecotipos de los cuales el INIA conserva el material genético de alrededor 2 mil ecotipos.

El INIA ha puesto a disposición de los productores agrarios a nivel nacional, siete cultivares mejorados que responden a la demanda tecnológica de las regiones productoras del país, en cuanto a rendimiento, calidad de grano, resistencia a enfermedades y plagas, así como cualidades agroindustriales:

1. Salcedo INIA
2. INIA 415 – Pasankalla
3. Illpa INIA
4. INIA 420 – Negra Collana
5. INIA 427 – Amarilla Sacaca
6. INIA Quillahuamán
7. INIA Altiplano (próxima a liberarse)



Figura 2.5. Diversidad de coloración de granos de quinua

2.3 VALOR NUTRICIONAL

El valor nutritivo de la quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) ha sido ampliamente reconocido debido a su alto contenido proteico y composición única de aminoácidos que incluyen a la lisina, un aminoácido esencial deficiente en muchos granos alimenticios (Larico *et al.*, 2014). Este grano es considerado por la

FAO y por la OMS como altamente nutritivo, sin gluten, el que permite también ser consumida por las personas con dolencia celica (alergia al gluten) (Soraide, 2011).

2.3.1 Proteína

Nowak *et al.* (2015) realizaron una revisión con el propósito de evaluar los datos de composición existentes sobre quinua que fueron compilados de acuerdo a la normativa internacional; encontraron un número limitado de datos que cumplieron con los criterios de calidad del conjunto de datos; en general, observaron amplias variaciones en el contenido de nutrientes de la quinua por 100 g de porción comestible, por ejemplo: proteína (9,1-15,7 g), grasa total (4,0-7,6 g) y fibra dietética (8,8-14,1 g); las variaciones de los valores de nutrientes entre diferentes variedades y entre las diferentes fuentes de datos fueron considerables; los resultados mostraron el potencial nutricional de la quinua, pero también demostraron que más datos analíticos de alta calidad sobre la quinua son necesarios, especialmente para minerales y vitaminas.

Tabla 2.2: Composición proximal de fracciones de granos de quinua, Nowak *et al.* (2015)

Componente	Grano Integral	Grano molido	Afrecho	Embrión	Perisperma
Proteína	12,9	13,3	6,1	23,5	7,2
Lípidos	6,5	6,7	3,9	10,2	5,0
Azúcares	63,7	64,6	54,2	43,1	78,2
Fibra Dietaria	13,9	12,7	26,6	18,9	8,5
FDS	4,3	4,4	2,1	7,5	2,2
FDI	9,6	8,3	24,5	11,1	6,3
Cenizas	3,0	2,7	9,2	4,3	1,1

Los contenidos están expresados en g/100 g base seca. El número entre paréntesis representa el porcentaje del contenido en cada fracción con respecto al contenido total en el grano integral. FDS: fibra dietética soluble. FDI: fibra dietética insoluble.

Las semillas de quinua pueden presentarse como: integrales (con cáscara o cubierta), descascaradas (cáscara removida) o como descascaradas con posterior lavado (saponinas extraídas) denominada por Stikic *et al.* (2012) como “purificadas”; en cada caso, la composición química será diferente; al respecto, estos autores en su trabajo discutieron que la proteína de quinua varía de 15,16 a 17,41 % dependiendo del procedimiento usado para la purificación de las semillas, la remoción de la cubierta significativamente redujo el contenido de proteína de 17,41 a 15,69 %, y posteriormente, aunque no fue significativo estadísticamente, con el lavado con agua para extracción de saponinas la reducción alcanzó 15,16 %; la misma tendencia a disminuir los valores en función del procedimiento usado ocurrió con la fibra y cenizas, mientras que para grasa aumentó. Ando *et al.* (2002) durante la molienda de granos integrales, separaron en fracciones el afrecho y el embrión del episperma, la relación porcentual obtenida fue: afrecho 8,2; embrión 30,1; perisperma 58,8 y 2,9 de pérdidas;

posteriormente, caracterizaron los componentes químicos para cada fracción de las semillas; la composición proximal de las fracciones se presenta en la Tabla 2.2, donde se aprecia que el afrecho contiene cantidades de todos los componentes, por lo que el procedimiento usado para la remoción de la cubierta influirá como lo señalaron Stikic *et al.* (2012) en los resultados finales; en tal sentido como expresaron Nowak *et al.* (2015), datos analíticos de alta calidad sobre la quinua son necesarios.

Las proteínas de quinua, son principalmente del tipo albúmina y globulina (Scarpati y Briceño, 1980 citado por Repo-Carrasco, 2008) reportan en cuanto al tipo de proteínas: Albúminas + globulinas un 45% de la proteína total, Prolaminas 25% y Glutelinas + proteínas insolubles 32%.

2.3.2 Aminoácidos esenciales

Padrón *et al.* (2015) muestran en la Tabla 2.3 resultados de composición de aminoácidos esenciales en semillas de quinua obtenidos por algunos autores, el valor promedio de los valores para isoleucina informados por Fischer *et al.* (2013) es ≈ 61 % menor al indicado por Koziol (1992) y en contraste el valor promedio de los valores del triptófano es ≈ 144 % mayor. González *et al.* (2012) En su trabajo resaltaron que la concentración de aminoácidos esenciales varió de 179,9 a 357,2 g/kg de proteína para semillas de quinua del noroeste argentino (en Encalilla) y de 233,7 a 374,5 g/kg de proteína para semillas de Tierras Altas (Bolivia/Argentina), por lo que factores medioambientales y climáticos influyeron en la composición en aminoácidos esenciales, e incluso fue más afectada que el nivel de proteína, destacaron los autores.

Tabla 2.3. Composición de aminoácidos esenciales en semillas de quinua, reportados por Padrón *et al.* (2014)

Phe	Hist	Ile	Leu	Lys	Met	Thr	Trp	Val	Referencia
7,7-8,0*	2,3-2,6	3,9-4,3	7,0-7,3	5,2	2,8-3,0**	4,3-4,4	3,6	4,8-5,0	(1)
3,2-3,4	3,7-3,9	1,7-2,1	4,9-5,3	5,1-5,7	0,4-0,9	4,4-5,4	1,9-2,5	2,0-3,2	(2)
4,34	1,99	-	7,50	4,58	2,25	3,49	-	6,00	(3)
3,50	3,80	2,39	5,63	6,98	1,75	4,01	-	2,83	(4)
6,9*	3,2	4,9	6,6	6,1	5,3**	3,7	0,9	4,5	(5)
3,9-4,5	2,7-3,5	2,9-3,8	6,4-7,2	4,1-4,8	1,4-1,9	3,2-3,6	-	4,3-4,9	(6)
3,05	2,19	2,93	5,12	4,27	1,89	2,25	-	3,47	(7)
4,52	4,09	3,02	6,88	6,30	2,27	4,41	-	3,67	(8)
4,7	2,6	5,0	8,3	3,9	2,2	3,0	-	5,3	(9)

Los contenidos están expresados en g/100g de proteína.

*Fenilalanina+tirosina. **Metionina+Cisteína

(1): Abugoch *et al.* (2008); (2): Fischer *et al.* (2013); (3): Gallego-Villa *et al.* (2014); (4): Gęsiński y Nowak (2011)

(5): Koziol (1992); (6): Miranda *et al.* (2012a); (7): Palombini *et al.* (2013); (8): Ranhotra *et al.* (1993); (9): Stikic *et al.* (2012)

Entre 18 aminoácidos evaluados por Fischer *et al.* (2013) en razón de posibles cambios por efecto de la restricción hídrica en la composición de semillas de 3 genotipos de quinua, encontraron que solo en los esenciales histidina y treonina se produjeron cambios significativos disminuyendo sus contenidos en semillas irrigadas a 95 % de disponibilidad de agua. Diferencias notables en el contenido de aminoácidos lo atribuyeron Cervilla *et al.* (2012b) a variaciones en la expresión genómica ocasionada por las condiciones ambientales y del suelo, incluso en una misma zona geográfica. En 6 genotipos cultivados en Chile, Miranda *et al.* (2012a) determinaron los aminoácidos esenciales, excepto triptófano. Stikic *et al.* (2012) tampoco lo determinaron, en Serbia, en una nueva variedad obtenida a partir de variedades locales de Chile y Perú seleccionada por precocidad y adaptación a las condiciones europeas, recientemente registrada (Puno KVL 37). El triptófano en semillas de quinua ha sido determinado por Koziol (1992), Abugoch *et al.* (2008) y Fischer *et al.* (2013). Por otra parte, en ensayos de

fertilización, evaluaron la influencia de varias aplicaciones de nitrógeno sobre las proteínas de semillas de quinoa de 2 variedades y sus composiciones en aminoácidos, las proteínas fueron fraccionadas en base a diferencias de solubilidad; la aplicación de nitrógeno afectó las fracciones de proteína, pero el contenido o la cantidad total de aminoácidos esenciales no cambió después de la aplicación de nitrógeno; los autores manifestaron que para la dieta humana, la fertilización con aplicación de nitrógeno podría ser una ventaja para mejorar los valores nutricionales por incrementar el contenido de proteína y mantener el contenido de aminoácidos esenciales.

La calidad de la proteína depende en gran parte de la composición de sus aminoácidos y su digestibilidad; si una proteína es deficiente en uno o más aminoácidos esenciales, su calidad es más baja y el más deficiente de los aminoácidos esenciales de una proteína se denomina “aminoácido limitante”, el aminoácido limitante determina la eficiencia de utilización de la proteína presente en un alimento o en combinación de alimentos y si un aminoácido esencial es insuficiente en la dieta, éste limita la utilización de otros aminoácidos para formar proteína. La importancia de las proteínas en especies de pseudocereales se basa en su calidad (Valcárcel-Yamani y Lannes, 2012).

La calidad nutricional de la proteína está determinada por las proporciones de aminoácidos esenciales los cuales no pueden ser sintetizados en el organismo y por tanto se deben suministrar en la dieta, si uno de estos aminoácidos esenciales es limitante los otros se descomponen y son excretados, lo que resulta en un crecimiento pobre y la pérdida de nitrógeno (Vega-Gálvez *et al.*, 2010). Los 9

aminoácidos indispensables son: fenilalanina (+ tirosina), histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina (+ cisteína), treonina, triptófano y valina; el requisito de lisina ha recibido mayor atención dada su importancia nutricional como aminoácido limitante en los cereales, especialmente trigo; de los aminoácidos aromáticos, fenilalanina y tirosina, el primero es nutricionalmente indispensable mientras que el segundo, como un producto metabólico del catabolismo de la fenilalanina, depende de que exista suficiente fenilalanina para suplir las necesidades de ambos aminoácidos, lo anterior también aplica para los aminoácidos azufrados, metionina y cisteína (WHO/FAO/UNU, 2007). Tirosina y cisteína, sumados a taurina, glicina, arginina, glutamina y prolina se consideran condicionalmente indispensables (Marsh *et al.*, 2013).

La quinua es el cereal de mayor y más completa composición de aminoácidos, contiene los 20 aminoácidos, incluyendo los 10 esenciales, especialmente la lisina, que es de vital importancia para el desarrollo de las células del cerebro, los procesos de aprendizaje, memorización y raciocinio, así como para el crecimiento físico. La quinua posee 40% más de lisina que la leche (considerada todavía como el alimento ejemplar de la humanidad). De allí su calificativo de súper cereal (Salcines, 2009).

Aporta aminoácidos como: histidina, isoleucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina; todos recomendados por la OMS/ONU (Prakash, 1998).

2.3.3 Carbohidratos

Los carbohidratos de la semilla de la quinua contienen entre 58 a 68% de almidón; se encuentran localizados en el perisperma en gránulos pequeños (2 μm), siendo más pequeños que los granos comunes; son parcialmente cristalinos e insolubles en agua a temperatura ambiente; los tamaños y formas dependen de la fuente biológica; es altamente digerible (Matos & Sanchez, 2011).

El almidón de la quinua ha sido estudiado muy poco. Sería importante estudiar sus propiedades funcionales. El almidón de quinua tiene una excelente estabilidad frente al congelamiento y la retrogradación (Ahamed, *et al.*, 1996). Estos almidones podrían ofrecer una alternativa interesante para sustituir almidones modificados químicamente (Repo-Carrasco, Espinoza & Jacobsen 2003). La variación genética del tamaño de gránulo de almidón de la colección boliviana de quinua fluctuó entre 1 a 28 μm , permitiendo esta variable dar una orientación agroindustrial (Rojas, Pinto & Soto, 2010).

Arzapalo (2015) determinó el contenido de almidón de quinua a nivel de laboratorio, encontrando la variedad negra Collana con un 71,30%, seguido de la variedad roja Pasankalla con 68,79% y la de menor porcentaje 66,37% la variedad blanca Junín. La viscosidad fue para la variedad negra Collana 2006,50cp; 1009,00cp roja Pasankalla y 1521,50cp para blanca Junín); por lo que desde el punto de vista de la viscosidad, la amilopectina con una mayor masa molar genera pastas más viscosas a altas temperaturas, mientras que la amilosa es la responsable de altas viscosidades cuando la pasta se enfría; Índice de solubilidad al almidón nativo (5,03 para collana negra, 4,94 para Pasankalla roja y 4,97 Blanca Junín).

Índice de absorción de agua presentan valores mínimos (4,66 Collana negra, 4,82 Pasankalla roja y 4,33 blanca Junín), debido al reducido tamaño de partícula característico del almidón de quinua. Retrogradación reportada fue: Collana negra 41,36%, Pasankalla roja 70,71% y 72,34% Blanca Junín.

Repo-Carrasco *et al.* (2001) manifiestan que la fracción de carbohidratos está constituida principalmente por almidón (50-60%), en forma de gránulos, cuyos componentes son la amilosa (20%) y la amilopectina (80%).

El almidón de quinua se presenta en forma de pequeños granos que se disgregan fácilmente; su color es blanco mate y después de molido y tamizado adquiere la consistencia de un polvo finísimo, inoloro y, a veces, ligeramente amargo. El almidón de quinua es altamente digerible, razón por la cual es muy recomendado en las dietas de enfermos y niños (Montoya, *et al.*, 2005). La amilopectina es un polímero ramificado de D-glucosa con tendencia a entrecuzarse y es la responsable de conformar la estructura esquelética de los gránulos. Por otra parte, la amilosa es esencialmente un polímero lineal de D-glucosa y su concentración en el granulo está asociada con las propiedades de cocción características del grano.

2.3.4 Lípidos

Tang *et al.* (2015a) calcularon un rendimiento en aceite de 6,58 a 7,17 % con contenido predominantemente de ácidos grasos insaturados (89,42 %) y con concentraciones mayores en semillas oscuras; y su vez apreciaron que la actividad antioxidante de extractos lipofílicos de semillas de quinua se correlacionó positivamente con los ácidos grasos poliinsaturados.

Peiretti *et al.* (2013) estudiaron el perfil de ácidos grasos de las semillas y plantas de quinua durante el crecimiento; entre los ácidos grasos de las plantas durante el crecimiento, el ácido α -linolénico fue el más abundante (385-473 g/kg del total de ácidos grasos), mientras que el contenido de ácido linoleico, el cual varió desde 146 hasta 176 g/kg del total de ácidos grasos, disminuyó con el crecimiento hasta la fase de brotación y luego aumentó.

Valcárcel-Yamani & Lannes (2012) en su comparación (g/100 g), el contenido de ácido linoleico fue el ácido graso más abundante en quinua con un intervalo de 48,2-56,0. En Tabla 2.4 se muestra la composición de ácidos grasos esenciales en semillas de quinua, acorde a determinaciones de algunos autores (Padrón, Oropesa y Montes, 2015).

Tabla 2.4. Composición de ácidos grasos esenciales en semillas de quinua (Padrón, Oropesa y Montes, 2015).

Ácido linoleico (C18:2)	Ácido α-linolénico (C18:3)	Referencia
52,0	9,8	Ando <i>et al.</i> (2002)
53,1	6,2	Kozioł (1992)
45,17-54,18	4,64-8,30	Miranda <i>et al.</i> (2012a)
51,653	2,873	Palombini <i>et al.</i> (2013)
50,2	4,8	Repo-Carrasco <i>et al.</i> (2003)
52,3	3,9	Ruales y Nair (1993)
44,2-57,5	3,2-9,4	Vidueiros <i>et al.</i> (2015)
52,3	8,1	Wood <i>et al.</i> (1993)

Peralta (2009), manifiesta que el contenido de lípidos en el grano de quinua puede llegar hasta 10% y la mayor composición se halla en el embrión. La composición

del aceite de la quinua es similar al aceite de soya, con predominio del ácido linoléico (C18:2) y linolénico (C18:3), que constituyen entre el 55-63% de la grasa de la quinua, (Koziol, 1990). Además, el aceite tiene antioxidantes naturales como tocoferoles que protegen a los ácidos grasos contra la oxidación. Los principales ácidos grasos presentes en el grano de quinua son: palmítico, cis-oleico, cis-linoleico y cis-linolénico siendo estos dos últimos esenciales para el ser humano.

2.3.5 Vitaminas

Con respecto al contenido de vitaminas y minerales, se ha reportado la presencia de cantidades considerables de vitaminas B1, B2, B3 y C; así como de calcio y hierro; además de cantidades menores de fósforo, magnesio y zinc (Oshodi, 1999).

En semillas de 3 cultivares de quinua de colores blanco, rojo y negro, Tang *et al.* (2015a) informaron que el contenido total de tocoferol varió desde 37,49 hasta 59,82 mg/g y la quinua negra tuvo el más alto contenido de vitamina E, seguida de la quinua roja y blanca.

Rahontra *et al.* (1993) al comparar sus valores obtenidos de vitaminas en semillas de quinua, notaron que los de B₁ y B₃ fueron menores a los de la mayoría de los granos más comunes y con B₂ ocurrió lo contrario. La quinua es una buena fuente de vitaminas, especialmente del complejo B y de vitamina C (Miranda *et al.*, 2013). Aunque la quinua posee altos contenidos de ácidos grasos insaturados, que son susceptibles a la oxidación, la grasa o el aceite de quinua es muy estable

debido al alto contenido de vitamina E (Stikic *et al.*, 2012). En este sentido, Tang *et al.* (2015a) han expresado que la actividad antioxidante de extractos lipofílicos de semillas de quinua se correlacionó positivamente con los tocoferoles totales.

2.3.6 Minerales

La composición de minerales en semillas de quinua en base a contenidos divulgados por Padrón, Oropesa & Montes (2015) es mostrado en el Tabla 2.5. Stikic *et al.* (2012) publicaron la composición mineral de semillas de quinua integrales, luego descascaradas y posteriormente purificadas (como se explicó previamente); la remoción de la cáscara o cubierta redujo de manera significativa estadísticamente, los contenidos de calcio, sodio, potasio, manganeso, y no fueron afectados los contenidos de fósforo, magnesio, hierro, cobre y zinc; en semillas purificadas (lavadas para extracción de saponinas luego de descascaradas) se redujeron los contenidos de sodio, potasio, hierro y manganeso, mientras que los demás minerales no fueron afectados. Estos resultados son coincidentes con los de Konishi *et al.* (2004) quienes publicaron valores para semillas de quinua integral y descascarada; las coincidencias fueron la reducción de calcio y potasio, y no fueron coincidentes respecto a los contenidos de fósforo, magnesio, hierro y zinc, donde la remoción de la cáscara si afectó; no publicó valores para sodio, manganeso y cobre.

2.3.7 Compuestos bioactivos y propiedades antioxidantes en quinua

Los antioxidantes son compuestos que inhiben o retrasan la oxidación de otras moléculas a través de la inhibición del inicio o la propagación de reacciones de oxidación en cadena; los antioxidantes naturales puede ser compuestos fenólicos

(tocoferoles, flavonoides y ácidos fenólicos), compuestos de nitrógeno (alcaloides, derivados de la clorofila, aminoácidos y aminos) o carotenoides, como también el ácido ascórbico (Velioglu *et al.*, 1998).

Tabla 2.5. Composición de minerales en semillas de quinua. Stikic *et al.* (2012)

Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Zn	Ref.
220	-	-	-	-	-	-	300	-	1
67,55	0,21	2,61	7,56	3,92	-	31,31	424,41	2,70	2
62,8-93,8	-	26,1-33,4	861,1-956,2	183,9-191,2	-	-	348,6-378,0	-	3
55,1-86,3	-	14,2-15,0	656,0-732,0	467,9-502,0	-	-	404,9-411,0	4,0	4
148,7	5,1	13,2	926,7	249,6	10,0	-	383,7	4,4	5
111-302	1,6-2,5	5,7-34,2	1064-2710	164,8-176,8	2,38-4,47	<0,01-11,33	288,8-460,2	7,67-9,56	6
172,8	-	-	765,2	189,6	1,8	31,7	-	-	7
108,41	1,55	10,28	935,70	298,24	3,41	7,31	45,86	-	8
70	0,7	6,3	855	161	3,5	2,7	462	3,2	9
68,55	-	2,95	-	-	-	-	-	2,95	10
87,4	1,0	8,1	1200	-	-	-	530	3,6	11
210-450	0,21-0,29	2,41-4,96	486-952	140-152	1,21-1,94	79-220	230-280	1,84-1,87	12
-	-	0,6-5,8	-	-	-	-	-	0,9-4,1	13

Los contenidos están expresados en mg/100 g peso seco. Ref.: referencias. 1_Demin *et al.* (2013), 2_Gallego-Villa *et al.* (2014), 3_González-Martín *et al.* (2013), 4_Konishi *et al.* (2004), 5_Kozioł (1992), 6_Miranda *et al.* (2013), 7_Pachauri *et al.* (2012), 8_Palombini *et al.* (2013), 9_Ranhotra *et al.* (1993), 10_Repo-Carrasco-Valencia *et al.* (2010b) 11_Ruales y Nair (1993), 12_Stikic *et al.* (2012), 13_Vidueiros *et al.* (2015).

Los compuestos fenólicos o polifenoles constituyen un amplio grupo de sustancias químicas, considerados metabolitos secundarios de las plantas, con diferentes estructuras químicas y actividad; muchas de las propiedades beneficiosas descritas en los alimentos de origen vegetal asociadas principalmente a la actividad antioxidante, como el rol protector en enfermedades cardiovasculares y cáncer como también en los procesos de envejecimiento, están relacionadas con la presencia y con el contenido de este grupo de compuestos fitoquímicos (Martínez-Valverde *et al.*, 2000). Los términos “actividad antioxidante” y “capacidad antioxidante” tienen diferentes significados: la actividad antioxidante se refiere a

la cinética de una reacción entre un antioxidante y el prooxidante o radical que reduce o atrapa, mientras que la capacidad antioxidante mide la eficacia de la transformación termodinámica de la reacción de un prooxidante con un antioxidante (Apak, *et al.*, 2013).

El contenido de compuestos fenólicos y su capacidad antioxidante fue determinado en granos de 15 variedades y/o cultivares de quinua del Departamento de Puno (Perú) por Repo de Carrasco y Encina-Zelada (2008); la variación fue de 35,29 a 139,94 mg ácido gálico/100 g y la capacidad antioxidante osciló entre 117,49 y 2400,55 μg Trolox/g de muestra, para ambas determinaciones los mayores valores correspondieron a la variedad o cultivar PIQ031046.

2.3.8 Factores antinutricionales de la quinua

Los factores antinutricionales son sustancias naturales no fibrosas, generadas por el metabolismo secundario de las plantas, que afectan el valor nutricional de algunos alimentos, especialmente semillas, pues dificultan o inhiben la asimilación de nutrientes que provienen de alimentos generalmente de origen vegetal. Desde el punto de vista bioquímico estos factores son de naturaleza variada y pueden llegar a ser tóxicos o causar efectos fisiológicos poco deseables como la flatulencia; distensión estomacal, afectaciones pancreáticas, aglutinación de glóbulos, disminución en la asimilación de nutrientes, entre otros. En la semilla de quinua, los factores antinutricionales presentes son las saponinas y los fitatos (ácido fítico).

La semilla de quínoa contiene varias sustancias antinutritivas que pueden afectar la biodisponibilidad de ciertos nutrientes esenciales como, proteínas y minerales; estos son saponinas, ácido fítico, inhibidores de tripsina y taninos (Improta y Kellems, 2001, citado por Rubio, 2005).

a) Saponinas

Las saponinas son sustancias orgánicas de origen mixto que se encuentra en la quinua, en las formas silvestres y las variedades amargas de quinua, el contenido máximo (aproximado) de saponina es de un 2,8% (aunque el rango es variable de acuerdo con la especie y el ecotipo), que comparado con las exigencias actuales del mercado, que fijan como valor límite 0,05% es extremadamente alto (Salcines, 2009). Además del fuerte sabor amargo, se ha descubierto que las saponinas son ligeramente tóxicas para los animales y el ser humano, y por ello deben ser eliminadas antes del consumo del grano.

La saponina que le da el sabor amargo al grano y cuya adherencia a la semilla es variable con los genotipos, la segunda capa es muy delgada y lisa, la tercera capa es de coloración amarillenta, delgada y opaca y la cuarta capa, translúcida, está constituida por un solo estrato de células, esta última unida a un perisperma compacto con ausencia de espacios de aire; el embrión, formado por 2 cotiledones y la radícula, constituye $\approx$ el 30 % del volumen total de la semilla, en el se encuentra la mayor cantidad de proteína y envuelve al perisperma (constituido por almidón) como un anillo (Jiménez de Erramouspe *et al.*, 2010).

Las saponinas son solubles en metanol y agua, consisten de una a seis unidades de hexosas o pentosas, unidas a una sapogenina aglicona. Las saponinas pueden tener agliconas esteroidales o triterpenoidales. Estas son capaces de producir espuma estable en soluciones acuosas, bajar el nivel del colesterol y producir hemólisis en las células sanguíneas (Ruiz *et al.*, 1996).

A más del sabor amargo que proveen a la quinua, las saponinas pueden formar complejos insolubles con minerales, como el zinc y el hierro, lo cual no permite que los minerales sean absorbidos por el organismo (Price *et al.*, 1989).

La saponina normalmente se encuentra en un rango de 0,11% a 2,0%, otorgándole un sabor amargo a la semilla. Sin embargo, es de fácil remoción por medio de lavado con agua. De acuerdo a la concentración de estos compuestos, se han separado las variedades de quínoa en “dulces”, que contienen menos de un 0,11% y variedades “amargas” con un contenido de saponinas mayor a éste (Berti *et al.*, 2000 citado por Rubio, 2005).

b) Fitatos

Las variaciones en el contenido de ácido fítico que se producen como consecuencia de las condiciones, localización y año de cultivo, aplicación de fertilizantes y variedad del cultivo se ha comprobado en distintos cereales y legumbres. En la Tabla 2.6, se muestra el contenido en ácido fítico de cereales, semillas de leguminosas, nueces, semillas de oleaginosas y vegetales obtenidos en diferentes estudios (Egli, 2001).

Tabla 2.6. Contenidos en ácido fítico de algunos vegetales

	Contenido en ácido fítico (g/100 g)	Autor
Quinua	0,7	Valencia <i>et al.</i> , 1999
Harina integral de quinua	9,28±0,19 µmoles/g	

Fuente: (Egli, 2001).

En la semilla de la quinua los fitatos están ubicados en las capas externas y también en el endospermo. La estructura de los fitatos se muestra en la Figura 2.6.

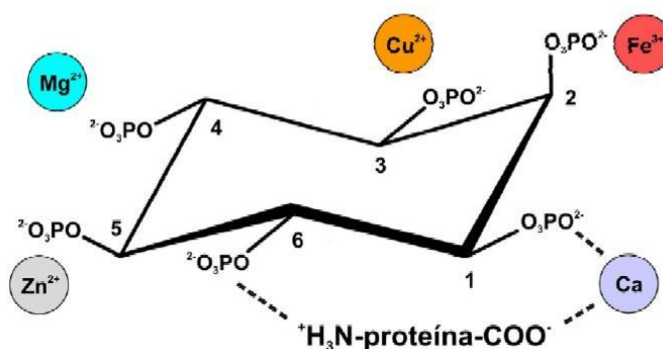


Figura 2.6. Estructura de los fitatos (ácido fítico)

Desde el punto de vista nutricional, el interés de los fitatos se debe principalmente a su capacidad de formar complejos con minerales esenciales (Cu, Zn, Fe, K, Mg y Ca), lo que disminuye la absorción intestinal y la biodisponibilidad de estos minerales para el consumidor, debido a que no están provistos de suficiente actividad de fosfatasas endógenas (fitasas), que sean capaces de liberar los minerales en la estructura del fitato.

Se les atribuyen tres roles fisiológicos importantes a los fitatos en las semillas: el almacenamiento de fósforo, el almacenamiento de energía y el inicio de la dormancia (Chichester, 1982).

Los fitatos pueden ser hidrolizados por la enzima fitasa (Niyini & Markakis, 1986). Como producto de este proceso se obtiene inositol y ortofosfato libre (Febles, 1998).

La hidrólisis enzimática de los fitatos es un proceso gradual, en el que cada éster fosfórico formado se convierte en el sustrato del siguiente proceso de hidrólisis (Niyini & Markakis, 1986).

Existen algunos tratamientos para la reducción de los fitatos, como por ejemplo los bioprocesos, donde el remojo como tal, influye en la hidrólisis de los fitatos. A través de la humedad y con ajustes de temperatura se logra una serie de cambios metabólicos, producto de la germinación del grano y la activación de algunas enzimas, entre las que se destaca la fitasa que provoca la hidrólisis de los fitatos (Sandberg, 1991), Figura 2.7.

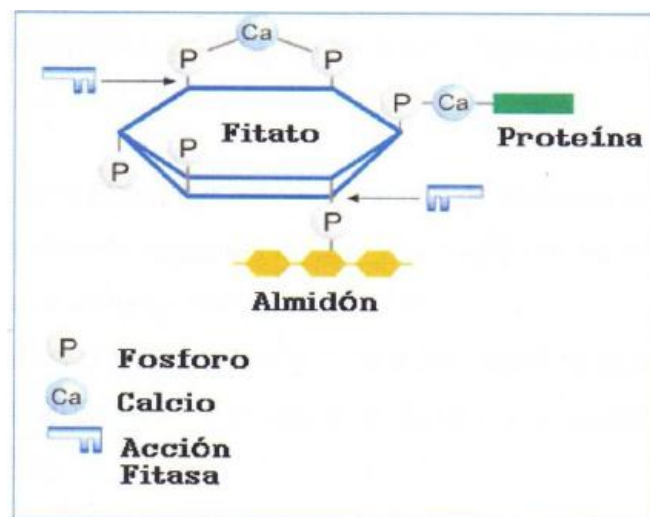


Figura 2.7. Acción de la enzima fitasa

Estudios desarrollados por De Boland *et al.*, (1975) estudiaron el efecto del autoclavado sobre el contenido de ácido fítico de granos o semillas y comprobaron que no se producía una excesiva pérdida (menor del 10%). No obstante, en 1989 Hussain *et al.*, describieron un descenso de un 16-64% en el contenido de ácido fítico en garbanzos tras el mismo procesado. Este tratamiento también produjo un descenso en el contenido de ácido fítico en judías (*Phaseolus vulgaris* L.) según recoge Díaz-Batalla *et al.*, (2006).

La extracción acuosa, especialmente mediante el empleo de ácidos diluidos, puede resultar efectiva como método de eliminación del ácido fítico en harinas de leguminosas. La mayor desventaja de este procedimiento es que también se eliminan cantidades considerables de minerales y de vitaminas hidrosolubles (Hurrell, 2004).

Desde el punto de vista nutricional, el interés de los fitatos se debe principalmente a su capacidad de formar complejos con minerales esenciales (Cu, Zn, Fe, K, Mg y Ca), lo que disminuye la absorción intestinal y la biodisponibilidad de estos minerales para el consumidor, debido a que no están provistos de suficiente actividad de fosfatasas endógenas (fitasas), que sean capaces de liberar los minerales en la estructura del fitato.

2.4 PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO

La producción de la quinoa a nivel mundial lo lidera el Perú 52,1 miles de toneladas, seguido de Bolivia con 50,5 miles de toneladas hasta el 2013, según el

reporte de la FAO reportado por El Diario de Economía y Negocios de Perú, Gestión (20 de enero del 2015) Tabla 2.7.

En relación al manejo agronómico Perú reporta una mejora en cuanto al rendimiento por Ha, según el reporte de la FAO, como se observa en la Figura 2.8. Desde el 2005 hasta el 2013, de acuerdo a cifras proporcionadas por la FAO, el Perú se ha convertido en el principal productor mundial de quinua.

Tabla 2.7. Producción (miles de toneladas) (El Diario de Economía y Negocios de Perú, Gestión 20 de enero del 2015)

	Años								
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Perú	32.6	30.4	31.8	29.9	39.4	41.1	41.2	44.2	52.1
Bolivia	25.2	26.9	26.6	27.2	34.2	36.7	40.9	45.8	50.5
Otros	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8
Mundial	58.4	58.0	59.1	57.8	74.4	78.7	82.9	90.8	103.4
%Perú/ Mundo	55.8	52.5	53.8	51.7	53.0	52.2	49.7	48.7	50.4

La quinua y sus derivados representan actualmente el principal producto de exportación y ubican al Perú como el primer exportador mundial de quinua, y como primer productor mundial de quinua seguido de Bolivia, como se observa en la Figura 2.8 y la Tabla 2.7, de acuerdo al reporte del Instituto Nacional de Estadística, publicado por el diario peruano como reporta El Diario de Economía y Negocios de Perú, Gestión (20 de enero del 2015).

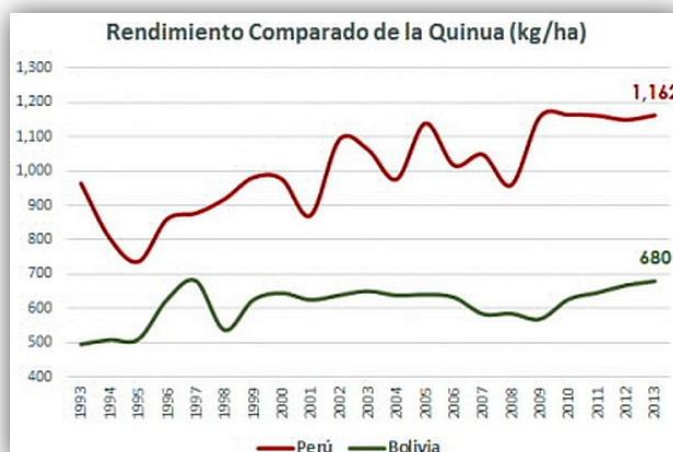


Figura 2.8. Rendimiento de producción de quinua por hectárea de Perú y Bolivia
(El Diario de Economía y Negocios de Perú, Gestión 20 de enero del 2015)

El destino de las exportaciones, en el que encabeza como país demandante Estados Unidos con 29 505,47 toneladas y precio FOB de 196,64 millones de dólares, seguido Francia, Alemania, Países Bajos, Canadá, Australia y Resto de Países.

Los principales departamentos productores de quinua en el Perú son: Puno, productor por excelencia, donde se concentra más del 50% de la producción nacional; seguida por Ayacucho, Arequipa y Junín, con 15%, 15% y 10% respectivamente.

2.5 INDUSTRIALIZACIÓN DE LA QUINUA

La quinua se cosecha cuando los granos han adquirido una consistencia tal que ofrezcan resistencia a la presión con las uñas, se verifica el grado de humedad del grano que no debe ser ni muy húmedo (12-15%) y posteriormente se realiza el

almacenamiento para la industrialización. A continuación se muestra un esquema de los principales procesos a los que es sometido el grano de quinua.

Del grano de la quinua se obtiene la saponina y el grano perlado. Del grano perlado es posible obtener harina, hojuelas, extruidos, expandidos y como granola. Del grano de la quinua también se puede obtener grasa, almidón, proteína y fibra. La grasa de quinua tiene una consistencia que cambia, según las variedades empleadas, desde la mantequilla de leche de vaca hasta la similar al aceite de oliva. A base de este aceite de quinua se pueden elaborar jabones sódicos de consistencia semidura, los cuales producen abundante y fina espuma. De la grasa presente en el grano de quinua es posible obtener ácido oleico y ácido linoleico.

El almidón en la industria sirve como espesante, extensor y para fabricar productos farmacéuticos, crema dental, labial, talcos, etc.

La fibra del grano de quinua se puede incorporar a alimentos de nutrición animal y a productos dietéticos para la nutrición humana.

2.6 CAMBIOS EN LOS COMPONENTES A PROCESOS DE PRESIONES Y TEMPERATURAS ELEVADAS

La extrusión termoplástica consiste en un proceso térmico de corta duración (alta temperatura corto tiempo) que se produce a temperaturas elevadas, en los que los materiales ricos en almidón y/o proteicas mojados, expansibles, son plastificados y cocidos, combinación de la humedad, la presión, la temperatura y la cizallamiento mecánico. La investigación ha demostrado que la extrusión

termoplástica inactiva los factores antinutricionales, tales como inhibidores de la proteasa, taninos y fitatos, además de aumentar la digestibilidad de la proteína y almidón, garantizando al mismo tiempo la obtención de productos seguros para su consumo, mediante la eliminación de microorganismos (naturalmente presente en materias primas o contaminante) por las altas temperaturas usadas (Shimelis y Rakshit, 2007).

El principio fundamental de esta tecnología se basa en el procesamiento de un material sólido en un fluido por aplicación de calor, trabajo mecánico y sometiéndolo a paso a través de un troquel, fomentando así su termoplastificación, con el fin de formar un producto de características físicas y geométrica predeterminada. El término termoplástico significa la capacidad para ablandar o fundir un material cuando se calienta y el endurecimiento de nuevo cuando se enfría (Gómez, 1997; González *et al.*, 2002).

Además, proporciona una hidratación de almidones y proteínas, homogeneización, cizallamiento, fundición de grasas, plastificación y la expansión de la estructura de alimentación (Fellows, 2006). Durante el proceso se producen cambios en las materias primas, tales como gelatinización del almidón, desnaturalización de la proteína, la inactivación enzimática, reacciones de Maillard (Chuang y Yeh, 2004), formación de complejos entre la amilosa y la grasa y reacciones de degradación de vitaminas, pigmentos y factores anti-nutricionales.

Es un proceso en el que la acción mecánica se combina con el calor para gelatinizar el almidón, ocurriendo una fluidización de los mismos, permitiendo crear nuevas texturas y formas en el producto final. Es un proceso muy versátil, con cambios mínimos en los equipos básicos y en las condiciones básicas de procesos, una gran variedad de productos se pueden obtener. Harinas y almidones pueden ser destinados a la producción de alimentos extruidos prácticos, tales como cereales para el desayuno, "snacks", comida para bebés y sopas instantáneas (Ascheri *et al.*, 2002;. Capriles & Areas, 2005).

González *et al.* (2002) afirman que el proceso de extrusión tiene numerosas ventajas, tales como: cocción rápido a altas temperaturas, por lo tanto, promueve la digestibilidad del almidón, desnaturaliza proteínas sin alterar su calidad, desactiva los factores tóxicos y antinutricionales, reduce o eliminando la carga microbiana y aumenta la vida útil.

2.6.1 Cambios químicos en el almidón

El perisperma del grano de quinua está constituido mayoritariamente por almidón, polímero de D-glucosa conformado por unidades de amilosa y amilopectina en distinta proporción, según las distintas variedades de quinua actualmente existentes.

El almidón es un sistema polímero heterogéneo, cuya estructura molecular se describe generalmente en términos de sus atributos químicos primarios: a) configuración de cadena, b) ramificaciones, y c) distribución de pesos moleculares. Los polímeros de almidón son ciertamente heterogéneos en todos

estos aspectos; ya que constituyen una mezcla de dos componentes distintos: la amilosa y la amilopectina, ambos son componentes de glucosa pero, difieren en tamaño y forma (Mondragón, 2004).

Los gránulos de almidón son física y químicamente inertes y poco digeribles por el organismo humano. Para cambiarlos en un producto funcional, generalmente, el almidón se calienta en exceso de agua para pasar eventualmente de una forma semicristalina y relativamente indigerible, a una forma amorfa fácilmente digerible. Inicialmente los gránulos se hinchan de manera reversible y la propiedad de birrefringencia no se pierde, sin embargo, cuando se alcanza una cierta temperatura el hinchamiento llega a ser irreversible, la birrefringencia se pierde y la estructura del granulo se altera significativamente. A este conjunto de eventos se le conoce como gelatinización la cual ocurre a una temperatura denominada temperatura de gelatinización, la cual en realidad es un intervalo de temperaturas (Mondragón, 2004).

La amilosa y la amilopectina no existen libremente en la naturaleza, sino como componentes del almidón. El almidón es un biosintetizado en forma de gránulos semicristalinos con varios tipos polifórmicos y grado de cristalinidad. El gránulo de almidón, está organizado en forma de anillos que van creciendo radialmente alrededor de un centro llamado hilum durante la biosíntesis (Mondragón, 2004).

La amilopectina es el componente altamente ramificado del almidón, el modelo mas ampliamente aceptado para la estructura de la amilopectina es el modelo de “racimos”. En él, se considera que la amilopectina está compuesta de cadenas

ensambladas en una estructura “racimosa” con partes compactas de cadenas orientadas y de puntos de ramificación que no están distribuidos de manera aleatoria en esta macromolécula (Mondragón, 2004).

Cuando el almidón se trata en agua caliente aparecen dos fracciones, el componente más soluble la amilosa que se disuelve y la amilopectina que permanece insoluble, produciéndose la fusión de la región cristalina, conformada principalmente por las cadenas de amilopectina, reacción conocida como gelatinización. Esta transición de fase ocurre a una temperatura constante definida conocida como temperatura de gelatinización. Un almidón con alta relación amilopectina/amilosa necesitará mayor energía térmica para gelatinizar (Peralbo, 2015).

La pérdida de la estructura cristalina ocurre a una cierta temperatura llamada (temperatura de gelatinización o TG), pero para que eso ocurra, el agua debe poder penetrar dentro del gránulo. Sin embargo cada gránulo posee su propia TG, debido a diferencias estructurales individuales (es la arquitectura la que determina la resistencia a hidratarse), así cuando se tiene una población de gránulos, se habla de rango de TG, y no de una TG fija.

Cuando el almidón se trata en agua caliente aparecen dos fracciones, el componente más soluble la amilasa que se disuelve y la amilopectina que permanece insoluble. En los cereales la amilasa viene a representar el 10-20% y la amilopectina el 90-80% del almidón total (Valls, 1993).



Figura 2.9: Cambios en el almidón en un proceso de calentamiento acuoso

En el proceso de extrusión, el gránulo de almidón absorbe agua y en el instante de salida de la matriz de la extrusora, el agua sometida a presión pasa a la forma de vapor y el almidón sufre un proceso de alineamiento, rizado y rotura tal como se muestra en las fotografías siguientes (Valls, 1993).

En el proceso de gelatinización, se pueden distinguir cuatro etapas (Mondragón, 2004). Estas se presentan cuando una suspensión acuosa de almidón se calienta con agitación:

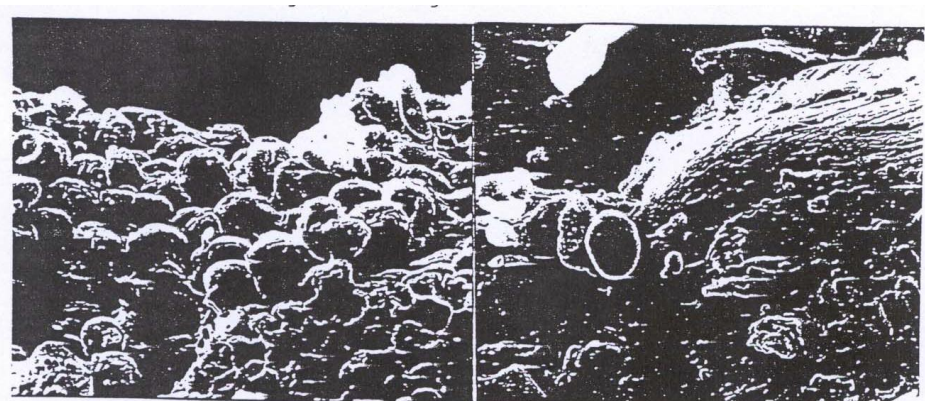


Figura 2.10: Cambio estructural en el almidón en un proceso de calentamiento acuoso

- 1) Los gránulos se hinchan por la absorción de agua, primeramente en las regiones amorfas, incrementando su volumen de un 30 a un 40%. Algunas moléculas de amilosa son lixiviadas de los gránulos.
- 2) Se presentan transiciones moleculares irreversibles asociadas con la fusión de los cristalitos. Estas transiciones involucran la disociación de las dobles hélices (la mayoría de las cuales están en las regiones cristalinas) y la expansión de los gránulos conforme aumenta la hidratación de los polímeros de glucosa. La temperatura inicial de transición (T_i , típicamente 45°C) presentada en estudios por DSC releja el inicio de este proceso, la cual es seguida por una temperatura pico (T_p , típicamente 60°C) y una temperatura final (T_f , típicamente 75°C). Después de T_f , todas las dobles hélices de la amilopectina se han disociado, aunque la estructura de los gránulos hinchados se retendrá hasta que se aplique más calor y temperatura. El intervalo de temperatura $T_f - T_i$ ($=R$) representa el periodo de gelatinización y la entalpia de gelatinización (ΔH) se calcula en base a este intervalo. La temperatura de gelatinización depende del contenido de agua. Si se calientan mezclas de agua-almidón a bajos contenidos de agua (35-60%), se observan dos temperaturas de fusión. La explicación es que, presumiblemente, parte de los cristalitos están en posición de absorber suficiente agua como para fundir a temperaturas más bajas, mientras que poca agua remanente queda disponible para la fusión de los cristalitos restantes. Debe resaltarse que la difusión del agua en los sistemas concentrados de almidones puede ser muy pequeña. La fusión ocurre en un rango más amplio de temperatura a bajos contenidos de agua, indicando que los cristalitos son menos perfectos. El calentamiento en

combinación con el contenido de agua puede alterar los cristalitos antes de que ellos fundan. A contenidos de agua mayores al 60% se presenta solamente una temperatura de fusión. La fusión no implica necesariamente que toda la estructura supermolecular desaparece, persiste un considerable enredamiento de las cadenas de amilopectina, y posiblemente persista parte de la estructura de las hélices más largas.

3) A temperaturas más altas (95° C) el hinchamiento se vuelve excesivo. Virtualmente toda la amilosa es lixiviada de los gránulos. Esto es prácticamente una separación de fase entre la amilosa y la amilopectina. Se observan aun gránulos altamente hinchados de forma irregular, pero no deben considerarse como que tienen una pared o membrana: la amilopectina se mantiene unida por enlaces covalentes y por enredamientos. El hinchamiento causa un gran incremento en la viscosidad aparente, especialmente a altas concentraciones de almidón. El grado de hinchamiento varía mucho entre los diferentes tipos de almidón. Cuando la mayoría de los gránulos ha pasado por este proceso, se considera que el almidón ha formado una pasta. En una gran cantidad de casos es esta capacidad de formar pastas viscosas lo que imparte al almidón su funcionalidad como un ingrediente en formulaciones de alimentos.

4) A temperaturas aún más altas, los gránulos se romperán en pequeños fragmentos, especialmente bajo agitación vigorosa. Esto puede ser tanto por un desenredamiento como por rompimiento de las moléculas de amilopectina. Esto causa que la viscosidad aparente disminuya nuevamente. Durante el

proceso de liberación de moléculas poliméricas, las pastas a menudo desarrollan una textura hulosa cohesiva.

Desde una perspectiva mecánica, el calentamiento del almidón en agua causa el rompimiento de los puentes hidrogeno entre las cadenas de polímeros, debilitando al gránulo. Se cree que el hinchamiento inicial se lleva a cabo en las regiones amorfas donde los enlaces de hidrogeno son menos numerosos y el polímero es mas susceptible de ser disuelto. Conforme la estructura comienza a debilitarse, los gránulos embeben agua y se hinchan. Dado que no todos los gránulos gelatinizan simultáneamente, pueden existir diferentes grados de hinchamiento y de desorganización estructural. El grado de hinchamiento y desintegración del granulo al igual que la lixiviación de la amilosa, dependen de la quinua y concentraciones del almidón, temperatura, presencia de otros solutos y la cizalla o agitación aplicada durante el calentamiento.

La pérdida de estructura del gránulo con la consiguiente liberación de la amilosa, provoca un aumento de la viscosidad del sistema, que da la apariencia y aspectos texturales característicos del grano procesado hidrotérmicamente.

Como consecuencia de estos cambios, además, el grano se vuelve más translúcido cuanto más completa es la gelatinización. Esta característica, conocida como grado de translucidez.

El proceso de gelatinización, como ya se ha dicho involucra el hinchamiento y dispersión del gránulo. No obstante no todos los almidones pueden ser dispersados totalmente en agua cuando se los cocina a 100 °C. Los almidones de papa, mandioca y los de cereales tipo “waxy” (escaso contenido de amilosa), son fácilmente dispersables, en cambio el almidón de cereales con almidón “normal” (contenido de amilosa entre 25 y 30 %) solo puede ser totalmente dispersado en condiciones extremas (temperaturas mayores a 100 °C y suficiente tiempo de tratamiento).

La posible formación de complejos amilosa-lípido y de entrecruzamientos formados con las moléculas de almidón y el calcio producen una disminución en la capacidad de hinchamiento en la solubilidad de las muestras (Mondragón, 2004).

Una vez completado el proceso de gelatinización e hinchamiento, al enfriar la dispersión, se produce otro proceso llamado retrogradación, involucra la asociación por puente hidrógeno, de cadenas de las amilosa que han sido dispersadas fuera del gránulo, formándose una nueva estructura (tipo “gel”) que incluye a los restos de gránulos parcialmente dispersados. Este proceso, cinéticamente lento, culmina con la separación de dos fases: una fase acuosa en la capa superior y una fase “gel”, en la parte inferior. Esta separación es llamada “sinéresis”. La velocidad a la que ocurre este fenómeno puede alterarse, variando las condiciones del proceso de cocción o agregando aditivos que retardan la asociación molecular. La agregación producida por la asociación de moléculas de amilosa es relativamente rápida, en cambio el correspondiente a la amilopectina

transcurre mucho más lentamente, esto es debido al impedimento estérico de sus ramificaciones. La malla formada por estas macromoléculas atrapa o retiene a los fragmentos de gránulos, aumentando considerablemente la viscosidad de la pasta, la cual a temperatura ambiente adquiere apariencia de gel.

2.6.2 Capacidad de hinchamiento

Los gránulos de almidón son física y químicamente inertes y poco digeribles por el organismo humano. Para cambiarlos en un producto funcional, generalmente, el almidón se calienta en exceso de agua para pasar eventualmente de una forma semicristalina y relativamente indigerible a una forma amorfa fácilmente digerible. Inicialmente los gránulos se hinchan de manera reversible y la propiedad de birrefringencia no se pierde, sin embargo, cuando se alcanza una cierta temperatura el hinchamiento llega a ser irreversible, la birrefringencia se pierde y la estructura del gránulo se altera significativamente (Biliaderis, 1991). A este conjunto de eventos se le conoce como gelatinización la cual ocurren a una temperatura denominada temperatura de gelatinización, la cual en realidad es un intervalo de temperaturas.

La técnica más utilizada durante la última década para el estudio de la gelatinización de almidones es la calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) (Tester & Debon, 1990). En los equipos de DSC disponibles actualmente, se monitorea la diferencia de flujo de calor que se suministra a la muestra y a una referencia para mantener condiciones isotérmicas; la muestra y la referencia se colocan en hornos con sistemas de calentamiento que trabajan individualmente. Si ocurre una transición exotérmica, la temperatura de la muestra

tenderá a adelantarse a la de referencia, en este caso el flujo de calor del DSC hacia la muestra disminuye para mantener la misma temperatura. Si ocurre una transición endotérmica, suministra más calor a la muestra para mantener la temperatura.

En la Figura 2.11 se muestra una curva típica obtenida por DSC de un almidón de cereal con un contenido de agua de 50%. Las transiciones endotérmicas a baja temperatura M_1 y M_2 (térmicamente irreversibles) reflejan la fusión de los cristalitos de amilopectina, como ya se mencionó en párrafos anteriores. Mientras las transiciones a mayor temperatura M_3 y M_4 (térmicamente reversibles) se han atribuido a procesos de orden-desorden de los complejos amilosa lípido con diferentes grados de organización helicoidal (Biliaderis, 1980).

2.6.3 Índice de solubilidad o dispersibilidad en agua (ISA)

El índice de solubilidad indica el nivel de degradación de los polímeros contenidos en éste. El índice de absorción de agua es una medida indirecta del grado del almidón gelatinizado por la cocción. Todas estas variables están relacionadas con la palatabilidad de los alimentos (Araujo 2004).

La solubilidad del almidón, se da a consecuencia del hinchamiento del gránulo y del incremento de la temperatura. El índice de solubilidad indican el grado de asociación existente (enlaces intragranular) entre los polímeros del almidón (amilosa y amilopectina) (Araujo 2004).

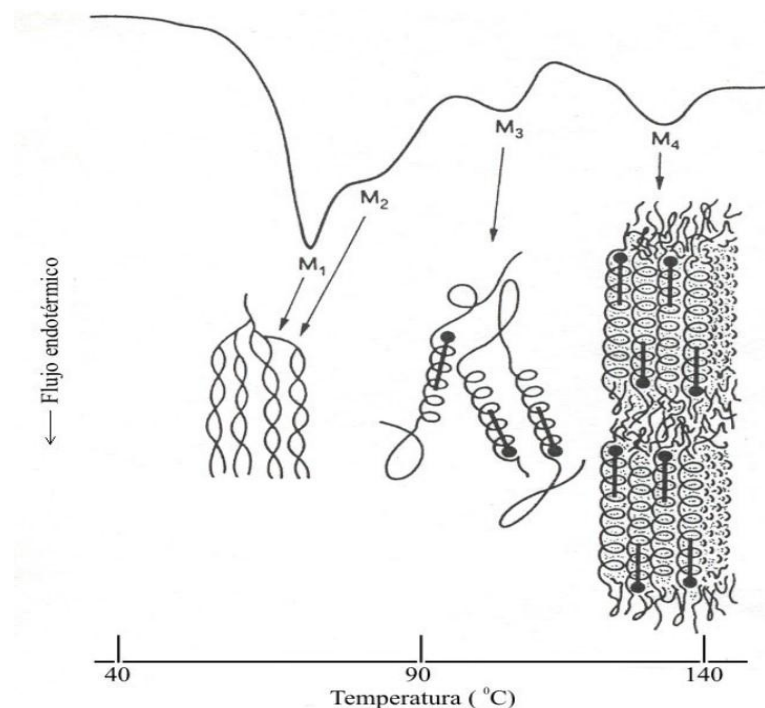


Figura 2.11. Curva típica de un almidón de cereal (50% sólidos) demostrando las distintas transiciones térmicas y los dominios estructurales en donde se presentan estas transiciones.

El incremento en la solubilidad se atribuye al contenido de amilosa, debido a que estas moléculas se solubilizan y salen al exterior del gránulo de almidón hinchado (Bou, 2006).

El índice de solubilidad del almidón es usado a menudo como un indicador de la degradación molecular del almidón, mide el grado de conversión del almidón durante la extrusión que es la cantidad de polisacáridos solubles liberados del componente de almidón después de la extrusión. También es un indicador del uso potencial que este producto podría tener, ya que si posee altos valores se puede utilizar en galletas, bebidas, atoles, etc. Por otro lado si el índice de absorción de agua presenta altos valores se puede utilizar como harinas, espesantes, en sopas etc.

2.6.4 Índice de absorción de agua (IAA)

El índice de absorción de agua y el poder de hinchamiento son usados como indicadores de la retención del agua. La capacidad de absorción de agua y la temperatura de gelatinización son características específicas de cada almidón en particular y dependen de diversos factores como por ejemplo el tamaño de los gránulos, relación amilosa/ amilopectina, fuerzas intra e intermoleculares, entre otras. Las variaciones en la capacidad de absorción de agua podrían ser atribuidas a la existencia de proporciones diferentes de regiones cristalinas (amilopectina) y amorfas (amilosa) dentro de los gránulos de almidón, así los gránulos con muchas zonas amorfas, débilmente asociadas, presumiblemente deberían absorber más agua y viceversa (Bou, 2006). El incremento de la temperatura causa un aumento del índice de absorción de agua, pues además de producir un rompimiento de las fuerzas intragranulares de la región amorfa, también conduce al inicio del desdoblamiento de las regiones con doble hélice y al rompimiento de las estructuras de amilopectina, con lo cual se va generando una desorganización de la estructura del gránulo (Rincón, 2009).

Este análisis permite cuantificar la cantidad de agua incorporada a la harina y el porcentaje de sólidos solubles disueltos en agua a una temperatura de 30 °C.

En la evaluación de las harinas, granos pre-cocidos se tiene en cuenta la absorción de agua y por otro lado la solubilidad o dispersibilidad en agua, las cuales están inversamente relacionadas (González *et al.*, 1986). Los cambios producidos sobre la estructura granular del almidón afectan a las propiedades de hidratación y la proporción de sólidos dispersables y gránulos (o restos de

gránulos hinchados) que determinaran las características reológicas de la dispersión de harina pre-cocido.

2.7 DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

2.7.1 Fundamentos y mecanismos

El secado o deshidratación es una técnica de conservación de alimentos cuyo objetivo principal es la disminución de la humedad de los mismos. Desde la antigüedad se ha reconocido que los alimentos con mayor contenido en humedad son los más perecederos, de tal manera que el control del contenido en agua es una herramienta para su conservación. Se ha observado también que diferentes alimentos con el mismo nivel de humedad pueden ser muy diferentes en su estabilidad por lo que se deben tener en cuenta además las interacciones del agua con otros componentes del alimento.

La operación de deshidratación permite además reducir el coste de transporte y almacenamiento por la disminución del peso y volumen de los productos. Y en último término, puede ser una herramienta para el desarrollo de nuevos productos (Travaglini *et al.*, 2001). Si bien, como se ha comentado, el principal objetivo de la operación de secado es aumentar la estabilidad, el proceso en sí provoca ciertos cambios en los alimentos que deben tenerse en cuenta.

Los cambios químicos contribuyen a la calidad final tanto de los productos deshidratados como de sus equivalentes reconstituidos, en lo referente al color, sabor, textura, viscosidad, velocidad de reconstitución, valor nutritivo y

estabilidad en el almacenamiento. El grado en que ocurren estos cambios depende de la composición del alimento y de la severidad del método de secado.

Otra consecuencia de la deshidratación de los alimentos es la dificultad que presenta su rehidratación en el caso de que éste sea un objetivo deseado. Las causas son de origen físico y químico, teniendo en cuenta por una parte el encogimiento y daño celular ocasionado, y por otra, la desnaturalización de las proteínas ocasionada por el calor y la concentración de sales. En estas condiciones estas proteínas de las paredes celulares no son capaces de absorber de nuevo el agua tan fácilmente, perdiendo así el tejido la turgencia y alterando la textura que caracteriza a un determinado alimento.

Estos factores relacionados con la calidad del producto deben ser analizados cuando se va a diseñar una operación de deshidratación de alimentos, para así provocar un mínimo daño al alimento, sin olvidarse de otros aspectos más tecnológicos relacionados con la eficacia y el coste del proceso. A nivel industrial, cuando el secado se hace por transmisión de calor al sólido húmedo, diversos son los tipos de secadores utilizados dependiendo de las características y propiedades físicas del producto húmedo y/o del procedimiento deseado para que ocurra dicha transmisión de calor.

Teniendo en cuenta que el alimento sometido a deshidratación se puede considerar como un sistema trifásico (matriz sólida, fracción líquida y fracción gaseosa), pueden distinguirse varios mecanismos de transporte de materia según la fase a través de la cual se produce el transporte y según se trate de agua líquida, agua

líquida más solutos o vapor de agua. Sin embargo, los mecanismos de transferencia más importantes en el interior del sólido son la difusión de agua en forma vapor o en fase líquida y la capilaridad. Por otro lado, en el seno del aire de secado también tiene lugar transporte de agua en forma vapor por mecanismo turbulento. El transporte de calor tiene lugar, en primer término, hacia la interfase sólido-gas (transferencia externa) y, en segundo lugar, a través del sólido (transferencia interna). La transferencia de calor hacia la interfase puede realizarse por mecanismos de convección, conducción y radiación. En algunas ocasiones es alguno de estos mecanismos el que predomina, mientras que en otras el calor se transmite por combinación de ellos (Fito *et al.*, 2001).

2.8 TRANSFERENCIA DE MASA EN DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

2.8.1 La difusión del agua durante el deshidratado de alimentos

Con relación al secado combinado, aire caliente-microondas, puede que los periodos de secado mencionados no sean tan fáciles de distinguir y, por lo tanto, la modelización del proceso sea más compleja (Andrés *et al.*, 2004).

Van Arsdel (1973), considera que las primeras fases del secado de alimentos húmedos se lleva a cabo a través de fenómenos de flujo capilar, y que las últimas etapas son indiscutibles gobernada por fenómenos de difusión.

La difusión másica del agua es un mecanismo básico bien aceptado para describir el movimiento de la humedad en alimentos y la ley de Fick ha sido usada para la descripción matemática del proceso. Sin embargo, no hay acuerdo general acerca

de la naturaleza exacta de la fuerza impulsadora para el secado (Alvarez *et. al.*, 1986).

Se acepta que durante el secado ocurre simultáneamente difusión líquida y de vapor. En forma cualitativa es claro que cuando la humedad del sólido es alta, el mecanismo controlante será el de difusión líquida, y a bajos contenidos de humedad, la difusión de vapor será preponderante, pero no se puede evaluar su contribución individual (Alvarez *et. al.*, 1986).

Los alimentos tienen generalmente una estructura heterogénea y esto hace difícil tener una idea precisa del mecanismo de difusión; es por ello que debe determinar experimentalmente un coeficiente de difusión efectiva.

Cuando el secado se verifica por evaporación de la humedad del área expuesta del sólido, la humedad debe desplazarse desde el interior del sólido hacia la superficie. La difusión de la humedad líquida se verifica cuando existe una diferencia de concentración desde el interior del sólido y la superficie. Este método de transporte de humedad es el que casi siempre se presenta con sólidos no porosos, donde se forman soluciones de una sola fase con la humedad (Geankoplis, 1998).

Debido a que no se pueden predecir teóricamente los coeficientes de difusividad efectiva, ya que los alimentos presentan estructuras muy complejas, los datos experimentales obtenidos de las curvas de secado son necesarios (Karathanos *et al.*, 1990).

Un sólido poroso contiene poros y canales interconectados de diversos tamaños. A medida que se evapora el agua, se forma un menisco de líquido en cada poro en el interior de sólido. Esto origina las fuerzas capilares por una tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas constituyen el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie. Los poros pequeños desarrollan fuerzas mayores que las producidas por poros más grandes (Geankoplis, 1998).

La contracción del sólido generalmente no se considera en la interpretación del proceso de secado. Los sólidos rígidos no se contraen apreciablemente, pero materiales fibrosos o coloidales tales como vegetales, frutas y otros alimentos sufren contracción, que pueden afectar tanto las propiedades del material como también sus propiedades de transporte (difusividad, conductividad, etc.) las cuales pueden esperarse que varíen continuamente durante el secado (Geankoplis, 1998).

El modelo de difusión líquida, según la ley de Fick, viene presentando buenos resultados tanto en alimentos de origen vegetal como animal, probablemente debido al hecho de que estos productos no presentan un periodo de tasa constante en las curvas características de secado (Araujo, 2000). Unos de los primeros en analizar el aspecto de difusión interna de agua líquida en el secado fueron Lewis (1921) y Sherwood (1929). La relación fundamental es presentada con la ecuación (2.1), que asume volumen constante:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \Delta(D_{ef} \cdot \Delta X) \quad (2.1)$$

Crank (1975) presentó diversas soluciones analíticas para la ecuación de difusión, considerando diferentes condiciones iniciales y de contorno y la difusividad

constante variando con la humedad. En sistemas de coordenadas (x, y y z) la ecuación de difusión es expresada como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ef} \cdot \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ef} \cdot \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \cdot \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

Asumiendo la geometría de una placa plana infinita, donde la transferencia de humedad durante el secado es predominantemente unidireccional y considerando la difusividad efectiva constante la ecuación anterior se reduce a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

Despreciando el encogimiento del material durante el secado y la resistencia externa al transporte de masa, y considerando que en la interface la humedad sea la de equilibrio constante, las condiciones del contorno e inicial para la humedad X es:

$$\begin{aligned} X &= X_0 & \text{en } t &= 0 & 0 < y < L \\ X &= X_e & \text{en } y &= L & t > 0 \\ \frac{\partial X}{\partial y} &= 0 & \text{en } y &= 0 & t > 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Asimismo, la media de la solución analítica de la ecuación (2.16) es Crank (1975)

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4L^2} D_{ef} * t \right] \quad (2.5)$$

Donde:

X : humedad del producto en el tiempo t (g agua/g materia seca)

X_e : humedad en equilibrio del producto (g agua/g materia seca)

X₀ : humedad inicial del producto (g agua/g materia seca)

L : semi-espesor de la lámina (m)

De : difusividad efectiva del agua (m^2/s)

t : tiempo de proceso (s)

n : número de términos de la serie considerados

Superíndices: o, inicial; e, equilibrio, t, para cada tiempo considerado

2.8.2 Difusividad Efectiva

La difusividad efectiva de humedad es una propiedad importante de transporte, siendo útil en el análisis de las operaciones de procesamiento de productos alimenticios, como el secado. Por ejemplo, debida a la compleja composición y la estructura física de los alimentos, no son determinadas por estimaciones precisas esta propiedad, siendo asimismo necesarias medidas experimentales (Saravacos & Rouzeous, 1984). Se puede entender la difusividad como la facilidad con que el agua es removida del material (Brod, 2003)

La temperatura y la humedad son las variables más relevantes en comparación con otras que afectan la difusividad efectiva, mas sin dejar de mencionar algunas como: constitución química y física del producto, forma y tamaño, las cuales pueden adecuarse al modelo matemático que describe el proceso de difusión (Brennan & Wang, 1980).

2.8.3 Modelos matemáticos en el deshidratado de alimentos

Alvarez y Legües (1986), desarrollaron un modelo matemático para uso en la interpretación de las curvas típicas experimentales de secado de agroproductos. Dicho modelo se basa en la solución de la ecuación de Fick de la difusión no estacionaria con un coeficiente de difusividad efectiva variable con el tiempo. Los

resultados obtenidos fueron aplicados a la deshidratación de uva sultanina, papas, rosa mosqueta, maíz y trigo, obteniéndose una buena correlación con los datos experimentales de los agroproductos estudiados.

Karathanos *et al.* (1990), realizaron una comparación entre dos métodos de estimación de la difusividad del agua durante el secado de suspensiones de almidón y propusieron los respectivos modelos matemáticos para la interpretación de las curvas de secado. Los métodos utilizados fueron el método de las pendientes de la curva de secado descrito por Saravacos y Raouzeos (1984) y un método por simulación en computadora, basado en la resolución de la segunda Ley de Fick por diferencias finitas, asumiendo el problema como del tipo no lineal, es decir de difusividad variable. Ambos métodos dieron resultados similares en geles ricos en amilopectina (baja porosidad), donde la difusión de agua es predominante. Los resultados fueron variables en el caso de almidón granular hidratado y en geles ricos en amilosa (alta porosidad), donde la difusión de vapor es predominante.

Para la estimación de la difusividad efectiva por el método de las pendientes, se consideraron los siguientes modelos matemáticos, dados por Cranck (1975), citado por Karathanos *et al.* (1990):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4L^2} D_{ef} * t \right] \quad (2.6)$$

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2}{4R^2} D_{ef} * t \right] \quad (2.7)$$

La ecuación (2.6), se cumple para planchas infinitas y la ecuación (2.7), para esferas. Estas ecuaciones no son sino el desarrollo de la segunda Ley de Fick, expresado bajo la forma de una serie infinita.

2.8.4 Enfoque no lineal del problema de transferencia de masa

En la teoría del secado, la difusividad juega un rol muy importante y por ser éste un parámetro que no se pueda medir experimentalmente en forma directa, es necesario desarrollar metodologías matemáticas teóricas, o semiteóricas, que permitan calcular su valor indirectamente, por ejemplo a través de curvas experimentales de humedad versus tiempo (Alvarez *et al.*, 1986; Karathanos *et al.*, 1990).

La aplicación de la segunda Ley de Fick describe matemáticamente el proceso de secado, y ha sido utilizado por muchos autores para predecir e interpretar este proceso. El modelo de difusión puede escribirse de manera muy general bajo la forma de la ecuación (2.8).

Hasta el caso donde se considera al valor de la difusividad efectiva constante, Crank (1975), citado por Alvarez *et al.* (1986), da soluciones para esta ecuación, para diversas situaciones físicas. La solución de la Ley de Fick considerando un caso de transferencia de masa unidireccional, en términos de una serie infinita para diversas geometrías es como sigue:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4L^2} D_{ef} * t \right] \quad (2.8)$$

Los valores de la difusividad efectiva (D_{ef}) obtenidos de la aplicación de la ecuación (2.8) a datos de secado de alimentos han tenido difícil interpretación y en algunos casos conducen a resultados anómalos en el sentido que de un trabajo a otro la difusividad efectiva varía fuertemente para un mismo material y de una forma poco lógica (Alvarez *et al.* 1986).

Alvarez *et al.* (1986), señalan que las formas geométricas características son placa, cilindro y esfera. En secado se suele usar la expresión de difusión unidireccional, integrada con **las siguientes suposiciones**, las cuales son usadas comúnmente en los trabajos de secado:

- El producto tiene una humedad inicial uniforme.
- No existe resistencia externa a la transferencia de calor y masa, de modo que la superficie está en equilibrio con el medio gaseoso. Esta condición podría no ser real para todo el tiempo de secado, sin embargo, se usa como una simplificación típica en el secado de alimentos.
- Las condiciones externas del aire de secado no cambian durante el proceso (temperatura, humedad relativa y velocidad).
- El sólido es simétrico.

En los últimos años, se ha demostrado que el valor de la difusividad másica del agua durante el secado de alimentos no es un valor constante, sino que varía a través del proceso (Alvarez *et al.*, 1986; Karathanos *et al.*, 1990). Por lo tanto, el proceso de secado puede enfocarse como un problema de transferencia de masa con un coeficiente de difusividad variable con el tiempo, haciendo de la ecuación diferencial una ecuación parcial no lineal. Para este tipo de problemas es difícil

obtener una solución exacta y no es posible su solución por métodos analíticos, sino solamente por métodos numéricos mediante programas computacionales.

Es importante destacar que en base a las consideraciones anteriores el coeficiente de difusividad efectiva definido por la ecuación (2.8) no debe ser interpretado como un coeficiente de difusión molecular cuando es aplicado al proceso de deshidratación de un alimento, sino como un coeficiente de una naturaleza más compleja en el cual se incluyen diversos efectos (Alvarez *et al.*, 1986).

Como se ha podido observar, el transporte de humedad dentro del sólido puede deberse a varios mecanismos que actúan simultáneamente, sin embargo, se acepta generalmente que el mecanismo que controla, a temperaturas moderadas, como las usadas para el secado de productos biológicos, es la difusión (Karathanos *et al.*, 1990). En este caso, la mayoría de las investigaciones se han basado en la aplicación de la segunda Ley de Fick, la cual es gobernada por una ecuación diferencial parcial de segunda orden.

La resolución de la ecuación diferencial puede ejecutarse mediante métodos analíticos o métodos numéricos, sin embargo, si se considera un valor de coeficiente de difusión no lineal, entonces la única opción de dar solución y desarrollo al problema físico, es mediante la aplicación de los métodos numéricos o métodos matemáticos (Alvarez *et. al.*, 1986).

2.9 MÉTODOS NUMÉRICOS

La meta de los métodos aproximados o numéricos es proporcionar técnicas convenientes para obtener información útil a partir de formulaciones matemáticas de problemas de física. Con frecuencia, este enunciado matemático no se puede resolver por métodos analíticos. O es posible que existan soluciones analíticas, pero de tal forma que no sean convenientes para la interpretación numérica directa (Perry y Chilton, 1984).

2.9.1 Estimación de la difusividad efectiva no lineal durante el secado de cuerpos geométricos regulares por el método de Alvarez y Legües.

La interpretación del secado de alimentos está basada en la segunda Ley de Fick, que se expresa bajo la forma de la ecuación. La solución expresada para la humedad promedio en todo el sólido se escribe bajo la forma de la ecuación.

Alvarez y Legües, en varios intentos por mejorar la precisión del modelo, realizaron estudios considerando a la difusividad efectividad como una función del tiempo. Sus resultados pueden ser resumidos en la siguiente ecuación general:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4L^2} D_{ef} * t \right] \quad (2.9)$$

Donde:

X : humedad del producto en el tiempo t (g agua/g materia seca)

X_e : humedad en equilibrio del producto (g agua/g materia seca)

X₀ : humedad inicial del producto (g agua/g materia seca)

L : semi-espesor de la lámina (m)

De : difusividad efectiva del agua (m^2/s)

t : tiempo de proceso (s)

n : número de términos de la serie considerados

Superíndices: o, inicial; e, equilibrio, t, para cada tiempo considerado

Para determinar el coeficiente de difusión aparente del agua se utilizaron diez términos de la ecuación (2.9).

2.10 REHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS DESHIDRATADOS

La mayoría de los productos deshidratados deben ser reconstituidos antes de su consumo, lo que hace necesario determinar las condiciones óptimas para la realización de dicho proceso; en consecuencia, es importante obtener productos rehidratados de textura aceptable en el menor tiempo posible. Diversos investigadores han reconocido que el grado de rehidratación es dependiente de la composición original del producto, condiciones del proceso y preparación, así como de la extensión del desorden químico y estructural provocado por el secado (Okos *et al.*, 1992).

El grado de rehidratación puede ser considerado como una medida del daño del material causado por el secado y el tratamiento que precede a la deshidratación (Mc Minn y Magee, 1997b). Haas y colaboradores (1974) correlacionaron la duración y severidad del proceso de secado con la velocidad y grado de rehidratación del producto, encontrando que se alcanzaba una mayor rehidratación en aquellos productos secados a tiempos cortos.

El grado de rehidratación final del producto deshidratado a las distintas temperaturas ensayadas puede ser expresado como capacidad de sorción de agua (RR), que nos indicaría la cantidad de peso ganado durante el proceso o a través del coeficiente de rehidratación (COR), que nos indica el grado de recuperación de peso respecto al producto fresco (Prabhanajan *et al*, 1995).

Algunos alimentos deshidratados enteros, en trozos o pulverizados, deben ser rehidratados para su consumo o uso posterior en diferentes procesos. Es por ello que el estudio de la transferencia de materia ocurrida durante el fenómeno de rehidratación es importante, por ejemplo para el caso de la leche en polvo, ésta no solo debe disolverse rápidamente, sino que también se debe formar una solución uniforme de características lo más parecida posible a la leche fresca (Hogekamp & Schubert, 2003).

Es importante considerar que la rehidratación no es el proceso inverso a la deshidratación, ya que ambos fenómenos tienen diferentes mecanismos de transferencia de materia y dependen de factores distintos. Las operaciones previas a la deshidratación, llamadas pretratamientos, tienen marcada influencia sobre las características y la composición del producto finalmente rehidratado. Aquellos pretratamientos que contribuyen a mantener la integridad de los tejidos permiten evitar mayores pérdidas de sólidos solubles hacia el medio de rehidratación (Lewicki, 1998). Ya durante el escaldado de vegetales, existen pérdidas por difusión de sólidos: vitaminas, azúcares, aminoácidos, minerales; adicionalmente una cantidad importante de sólidos solubles puede migrar a la solución durante la rehidratación, afectando la calidad nutricional del producto y su capacidad de

imbibición de agua (Marabi *et al.*, 2004). Los pretratamientos que emplean altas presiones, previos a la deshidratación osmótica provocan cambios en la estructura de los tejidos, la compactación de las estructuras celulares y transformaciones de los geles de la pectina, modificando negativamente la posterior rehidratación del producto (Rastogi & Niranjana, 1998). Por otra parte la deshidratación a altas temperaturas provoca cambios que son irreversibles en el alimento: pérdida de textura, disminución de vitaminas, color y aroma, entre otros.

Varios autores proponen que la rehidratación se puede considerar como una medida del daño en el alimento ocurrido durante la deshidratación, considerándose como un complejo proceso que ayuda a restaurar las propiedades del alimento fresco, anteriormente deshidratado con o sin pretratamientos al secado (Hogekamp & Schubert, 2003). En algunos casos la velocidad de rehidratación sirve como medida de la calidad del producto deshidratado, siendo los alimentos deshidratados en condiciones óptimas, los que se deterioran menos y se rehidratan de forma normal (Weerts *et al.*, 2006).

Los alimentos deshidratados deben en lo posible rehidratarse lo más rápido posible y mostrar las mismas características estructurales y químicas del alimento fresco, como también sus propiedades nutricionales y sensoriales (Vega, 2003). Para ello se han propuesto nuevas tecnologías de secado además de combinaciones de las ya existentes, pero de altos costos, no resultando rentables a nivel industrial. Por ejemplo, se han realizado experimentos de rehidratación aplicando vacío y ultrasonidos (Lee *et al.*, 2006). No obstante, el aumentar la temperatura de la

solución rehidratante sigue siendo el método más utilizado para reducir el tiempo de rehidratación sin incurrir en mayores costos de operación.

En cuanto a la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación (Figura 2.12), se puede mencionar que el agua (o solución hidratante) es absorbida más rápidamente al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente la absorción hasta que el contenido de humedad alcanza un equilibrio, es decir, que todos los espacios inter o intracelulares queden saturados con agua o con solución hidratante. De esta manera la absorción de agua por parte de los tejidos del alimento deshidratado aumenta sucesivamente el volumen del mismo, junto con una salida de los sólidos desde el interior de estos tejidos (Krokida & Marinou-Kouris, 2003).

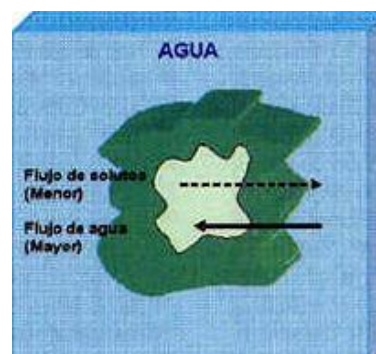


Figura 2.12. Modelo de adsorción de agua en un deshidratado alimenticio

2.10.1 Factores que influyen sobre el proceso de rehidratación

Dentro de los factores que influyen en los mecanismos de transferencia de materia ocurridos durante el fenómeno de rehidratación de alimentos, están los factores propios del proceso de deshidratación (pretratamiento, método de secado, temperatura y velocidad de secado, almacenamiento) y las condiciones de rehidratación a utilizar (Lewicki, 1998).

a) Factores extrínsecos del proceso de rehidratación

- **Pretratamiento al secado:** todo pretratamiento de secado tiene cierta influencia sobre el producto deshidratado en el proceso posterior de rehidratación. Estos pretratamientos se pueden citar de acuerdo a tratamientos químicos con compuestos inorgánicos (dióxido de azufre, cloruro de calcio, metabisulfito de potasio, cloruro de sodio, bicarbonato de sodio), orgánicos (sacarosa, glicerol, dextranos, almidón) o no químicos (osmosis, escaldado, congelado, altas presiones) (Lewicki, 1998). Por ejemplo la tecnología con altas presiones pueden ser utilizados para reducir la pérdida de solutos durante la rehidratación, una posible razón se puede atribuir a los cambios estructurales por las altas presiones: compactación de la estructura celular y la formación de una re-gel con iones ligados a pectina de-esterificada (Rastogi & Niranjana, 1998).
- **Método de secado:** los diferentes tipos o sistemas de secado son la principal causa que pudiese afectar la rehidratación del producto deshidratado. También se pueden hacer combinaciones de los sistemas de secado, por ejemplo aire caliente con microondas, irradiación previa o al mismo tiempo; igualmente se debe considerar el tipo de secado que menor daño provoque a la estructura del producto, y sobre sus propiedades sensoriales y nutricionales (Sanjuán, 2001). Por ejemplo, la combinación de deshidratación osmótica y aire caliente mantiene de mejor manera el color superficial del pimiento que el secado solo por aire caliente (Vega, 2003). Alimentos con alto contenido de almidón (papas) secados con microondas retienen dos veces más vitamina C que por secado convectivo (Hogekamp & Schubert, 2003). Recientemente,

pretratamientos con campos de pulsos eléctricos, ultrasonidos e infrarrojo en combinación con secado convectivo permiten una mejor permeabilización de las membranas celulares, menos cambios estructurales y una mayor retención de sólidos luego de la rehidratación (Krokida & Maroulis, 2001).

- **Temperatura y velocidad de secado:** se ha observado que altas temperatura de secado implican un menor tiempo de rehidratación, pero los índices de calidad del producto final presentan cambios muy variables con respecto al producto fresco, como son la textura y el color, dejando ver que la temperatura de secado es uno de los principales factores que influyen sobre la calidad del producto rehidratado (Lewicki, 1998). El aumento de la velocidad de secado provoca un menor tiempo de secado, pero también presenta la misma tendencia que la temperatura de secado, un mayor daño celular (Lewicki, 1998).
- **Temperatura de almacenamiento:** durante el almacenamiento se va perdiendo calidad de los productos deshidratados (color, aroma, textura), además aparecen reacciones de pardeamiento no-enzimático. Estos daños se hacen más severos a medida que se aumenta la temperatura de almacenaje, ya que a mayor temperatura mayores son los cambios composicionales y estructurales de los polisacáridos de la pared celular y menor la capacidad de absorción de agua, reflejándose esto último en la rehidratación. Por todo lo anterior es que se debe optimizar las condiciones de almacenamiento (temperatura, humedad relativa, oxígeno, ventilación, condiciones higiénicas, equipos, entre otros (Weerts *et al.*, 2006).

b) Factores intrínsecos del proceso de rehidratación

- **Líquido de rehidratación:** como se comentó, los alimentos deshidratados generalmente se rehidratan con agua, pero en algunos procesos se utilizan medios de rehidratación tales como leche, yogur, disoluciones azucaradas o salinas, entre otros, siempre con el fin de mejorar las características finales del producto rehidratado, como son la textura, retención de color y aroma, aumento de la viscosidad, disminución de la actividad de agua (a_w), reducción de tiempos de proceso, entre otros (Lewicki, 1998). La velocidad de rehidratación es mayor en un medio como el agua, en cambio es menor por ejemplo en soluciones azucaradas, leche o yogurt, debido a la elevada viscosidad que presentan éstas, sin embargo, estas últimas pueden transportar sólidos de importancia nutritiva al producto como vitaminas, proteínas, minerales, entre otros (Lewicki, 1998).
- **La temperatura de la solución de rehidratación:** Un alimento deshidratado a una temperatura constante, y luego rehidratado a diferentes temperaturas en un medio rehidratante, aumenta su contenido de humedad de equilibrio cuanto mayor sea la temperatura de rehidratación, debido al gradiente de calor entre el interior del alimento y el líquido de inmersión, además la alta presión que se ejerce sobre los gases que pudiesen estar atrapados entre los espacios intercelulares, permite que se mueven por difusión o capilaridad, tomando ese lugar el líquido rehidratante (Krokida & Maroulis, 2001).
- **Agitación durante la rehidratación:** la generación de turbulencia en el medio de rehidratación logra una mayor homogenización, aumentando la

entropía del sistema y la facilidad del intercambio de materia (agua y solutos), siempre teniendo en cuenta la velocidad de agitación (Krokida & Maroulis, 2001).

- **Características del producto:** antes de aplicar rehidratación a alimentos deshidratados, se deben conocer las características del alimento en su estado fresco y deshidratado, ya que las propiedades físico-químicas, mecánicas (microestructurales), sensoriales y nutricionales, cambian considerablemente de un producto fresco a deshidratado, de tal manera que estos factores determinan el comportamiento de los alimentos en el proceso de rehidratación (Krokida & Maroulis, 2001).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN

La parte experimental del presente trabajo se llevo a cabo en el Laboratorio de Alimentos y de operaciones unitarias de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Se inició en agosto del 2014 y se concluyó en abril 2015.

3.2 MATERIA PRIMA

Se trabajo con quinua (*Chenopodium quinoa*) de las siguientes variedades: Negra Ccollana, Pasankalla, Rosada de Juli, Ayrampo y Amarilla Compuesta, adquirida de INIA Ayacucho.

3.3 REACTIVOS Y MATERIALES

- Agua destilada
- Diversos materiales de vidrio: pipetas, tubos de ensayo, bureta, vasos, erlenmeyers, etc.

3.4 EQUIPOS E INSTRUMENTOS

- Balanza analítica marca OHAUS, Modelo AS200, Serie 3526, de capacidad 160 g, sensibilidad 0,0001g.
- Centrifuga marca Quimis.
- Estufa a presión atmosférica marca MEMMERT, con control automático de temperatura.
- Autoclave vertical a presión de vapor, con sistema eléctrico y ingreso de agua para la vaporización y control de presión de escala 0 a 3 kgf/cm².
- Secador de bandeja de aire caliente, con control de velocidad de aire, temperatura y balanza incorporada.
- Equipo de baño maría.

3.5 ENSAYO PRELIMINAR DE COCCIÓN

De acuerdo a los ensayos preliminares en el equipo de autoclave, se realizaron pruebas preliminares: en función a los límites mínimos y máximos de trabajo de presión del equipo, que fue de 2 kg/cm² como máximo y la presión mínima se eligió 1 kg/cm² como la presión de trabajo, en función a la máxima presión atmosférica a nivel de Ayacucho que es de 0.768 kg/cm². Pruebas a tiempos menores de 3 minutos no existía cocción y a tiempo superiores de 5 minutos existía cocción de la quinua en las distintas variedades.

3.5.1 Prueba sensorial de cocción

La prueba sensorial de cocción se realizó a través de la prueba de diferencia simple, en el que se compara la muestra cruda con la muestra cocida. El grano

crudo no tiene el desprendimiento de aro del embrión y el grano cocido tiene el desprendimiento de aro del embrión. Como podemos observar en la Figura 3.1



Figura 3.1, Estadios de cocción de granos de quinua (Prueba sensorial)

3.6 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental a usarse en la presente investigación es lo que se muestra en la Figura 3.2 que se muestra.

3.6.1 Diseño estadístico

La estructura del diseño experimental se realizó sobre un modelo de superficie de respuesta usando el diseño Factorial de 2 niveles: 2^2 el cual estudiará los efectos de 2 factores en 9 corridas. La característica de éste tipo de arreglo reside en que solo con una fracción de experimentos se obtiene información satisfactoria a partir de la cual se puede deducir el comportamiento del sistema. El diseño fue desarrollado en base a las pruebas preliminares que se encontraron valores mínimos y máximos. En base a ello se realizó el diseño que es mostrado en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2.

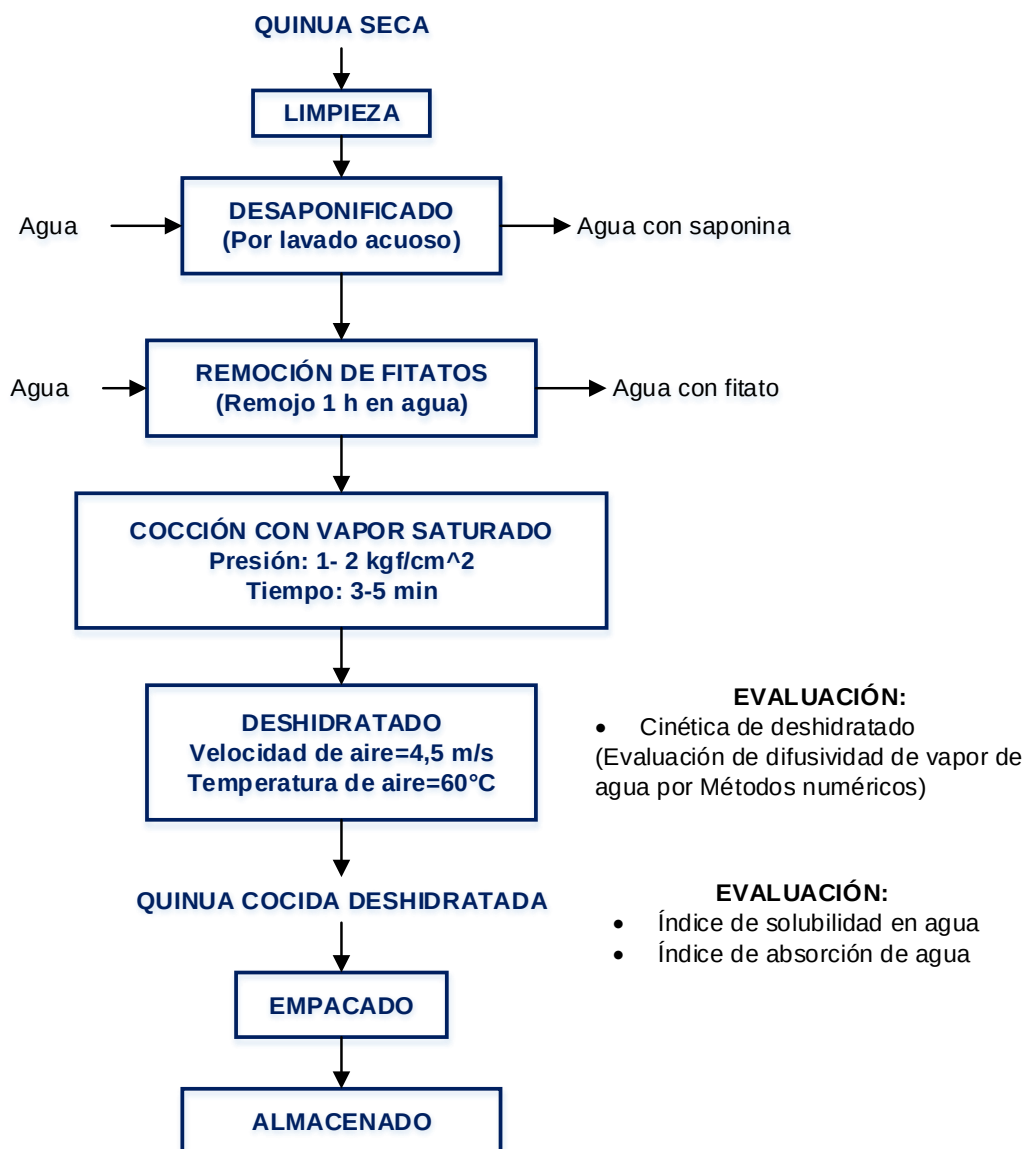


Figura 3.2: Diseño experimental para la obtención de quinua cocida deshidratada

Tabla 3.1. Valores máximos y mínimos de variables independientes: presión y tiempo de cocción de la quinua.

<i>Factores</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Unidades</i>
Presión	1	2	kg/cm ²
Tiempo	3	5	min

Tabla 3.2. Diseño estadístico de estudio de las variables independientes.

Tratamiento	Presión de vapor saturado	Tiempo
	(Kg/cm ²)	(min)
1	1,5 (127,2°C)	4,0
2	1,0(120,115°C)	4,0
3	2,0(133,24°C)	5,0
4	1,5 (127,2°C)	5,0
5	1,0(120,115°C)	5,0
6	2,0(133,24°C)	3,0
7	1,5 (127,2°C)	3,0
8	1,0(120,115°C)	3,0
9	2,0(133,24°C)	4,0

Las variables dependientes serán: índice de absorción de agua (g agua/g m.s.), índice de solubilidad en agua (%).

3.7 MÉTODOS DE ANÁLISIS

3.7.1 Humedad según el método de la A.O.A.C. (1990).

Mediante Método 930,15 A.O.A.C. 1996

3.7.2 Determinación del índice de solubilidad en agua (ISA)

Con referencia a la solubilidad, esta propiedad es considerada un buen indicador del grado de cocción. Son los gramos de sólidos solubles por gramos de sólidos totales. Se utilizó la técnica descrita por (Anderson, *et al*, 1969) con las modificaciones realizadas por (González, *et al*, 1986). Se suspendieron 1,25 g de muestra en 25 ml de agua en tubos de centrífuga a temperatura ambiente y se agitó durante 30 min; se centrifugó a 2000xg por espacio de 30 min, obteniéndose un sobrenadante y un residuo o gel insoluble. En el sobrenadante, se determinó el

contenido de sólidos solubles por evaporación en estufa a 105 °C y se calculó la solubilidad como el porcentaje de este peso respecto al de la muestra seca.

$$\%ISA = \frac{\text{Peso del residuo de evaporación}}{\text{Peso seco de la muestra}} * 100 \quad (3.1)$$

3.7.3 Índice de absorción de agua (IAA)

Seguido luego de la metodología anterior, el líquido sobrenadante fue retirado, previo a ello los tubos de ensayo fueron pesados, para el cálculo de la masa del residuo de la centrifuga (ma). La ecuación adaptada por Hashimoto & Grossmann (2003), fue usada para o cálculo del índice de absorción de agua (IAA):

$$IAA = \frac{\text{Peso del residuo de centrifugación}}{\text{Peso seco de la muestra} - \text{Peso del residuo de evaporación}} \quad (3.2)$$

3.8 CINÉTICA DE SECADO

La evolución de la humedad de las muestras con el tiempo se obtuvo a partir de la evolución del peso de las muestras durante el secado y de la humedad inicial de las mismas.

La duración de las experiencias de secado de los diferentes productos utilizados en este trabajo se extendió hasta una pérdida de peso predeterminado de las muestras respecto a su peso inicial, determinado en función de la humedad inicial del producto. Los porcentajes de pérdida de peso seleccionados variaron para los diferentes productos según su contenido de humedad inicial: quinua rosada (18,52

%), quinua amarilla (18,53 %) y quinua ayrampu (18,50 %), quinua negra (18,0%) y quinua pasankalla (18,54%).

Los intervalos de tiempo fijados entre las pesadas durante las experiencias de secado también variaron en el mismo intervalo de tiempo. Esta variación está en relación con el tiempo total de secado de cada producto. Así en los que el secado fue más largo, se espaciaron las pesadas para evitar tener un excesivo número de puntos experimentales.

3.9 MODELIZACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE SECADO

A continuación se muestran los diferentes modelos utilizados para la descripción matemática de las cinéticas de secado.

3.9.1 Modelos difusionales que no consideran la resistencia externa (SRE)

Se utilizó la solución integrada de la segunda ley de Fick a tiempos largos, considerando la bandeja de quinua como una lámina de geometría infinita, y asumiendo que: (1) el contenido de humedad inicial es uniforme en los gránulos de quinua; (2) la geometría permanece constante durante el proceso de secado (Crank, 1975).

En los modelos que desprecian la resistencia externa a la transferencia de materia, se asumió que el proceso de secado fue controlado exclusivamente por el movimiento del agua en el interior del sólido. Por lo tanto, se supuso que los puntos de la superficie del sólido alcanzaron la humedad de equilibrio nada más

entrar en contacto con el aire de secado. La condición de contorno que expresa esa suposición para una lámina infinita se muestra en la Ec. (3.3).

$$X_p(L, t) = X_e \quad (3.3)$$

Una vez formulado el problema difusional, es decir obtenida la ecuación de gobierno y las condiciones iniciales y de contorno, se debe proceder a su resolución. En los casos en que no se tiene en cuenta la resistencia externa, se puede abordar la resolución analítica del problema. Crank (1975) recopiló las ecuaciones difusionales para diferentes geometrías sencillas resueltas utilizando el método de separación de variables. La solución analítica que se obtiene debe integrarse para todo el volumen del sólido para obtener su humedad media. En la Ec. 3.4 que se muestra esta solución para las geometrías de lámina infinita.

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4L^2} D_{ef} * t \right] \quad (3.4)$$

Donde se calculó en función del contenido de humedad (b.s.) de la muestra a tiempo t (X), a t=0 (X₀) y en el equilibrio (X_e). **Def**, es el coeficiente de difusión aparente del agua (m²/s) y L es el espesor medio de la quinua (m) en la bandeja.

Para determinar el coeficiente de difusión aparente del agua se utilizaron 15 términos de la ec.(3.4). El valor D_{ef} se obtuvo mediante un ajuste no lineal de los puntos experimentales de solución de ecuaciones no lineales por el método de Newton Rhapsion elaborado el programa en el Interfaz GUIDE de Matlab.

3.9.2 Evaluación estadística

Para la validación de los modelos fueron calculados el coeficiente de regresión (R), el porcentaje de confianza (P) y el error medio relativo, que es definido como la diferencia relativa entre los valores experimentales y los predecidos (ecuación 3.5), siendo considerado predictivo el modelo que presenta valores de E menores que 10% (Lomauro *et al.*, 1985).

$$E(\%) = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{X_{pred} - X_{exp}}{X_{exp}} \right| \quad (3.5)$$

Donde X_{pred} y X_{exp} representan los valores predecidos por el modelo y los obtenidos experimentalmente, y N es el número de puntos experimentales.

3.10 REHIDRATACIÓN

Se colocaron las quinuas deshidratadas previamente pesadas en recipientes tipo malla. Luego estas fueron sumergidas en agua a punto de ebullición. A tiempos prefijados se retiraron y escurrieron, se retiró el exceso de agua con papel tissue y se pesaron hasta obtener valores de pesada constante en el tiempo. Se eligieron esta temperatura de ebullición, por ser la temperatura habitual de cocción de los preparados alimenticios donde podría eventualmente ser utilizado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 RESULTADOS DE CALIDAD DE COCCIÓN: ÍNDICE DE SOLUBILIDAD DEL ALMIDÓN (ISA) Y EL ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA) DE QUINUA COCIDA DESHIDRATADA

Los resultados del Diseño factorial, para verificar los efectos de la presión de vapor saturado (kgf/cm^2) y tiempo de cocción (min) sobre las propiedades físicas de los productos cocidos en autoclave son presentados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resultados obtenidos de las variables respuestas analizadas (ISA, IAA) por el diseño factorial.

Presión (kg/cm ²)	Tiempo (Min)	Amarilla compuesta		Rosada de Juli ROSADA		Negra Ayrampo		Negra Ccollana		Pasankalla	
		ISA (%)	IAA (g agua/g ms)	ISA (%)	IAA (g agua/g ms)	ISA (%)	IAA (g agua/g ms)	ISA (%)	IAA (g agua/g ms)	ISA (%)	IAA (g agua/g ms)
1(120,1°C)	3	16.04	3.31	16.39	3.37	17.02	4.08	16.08	4.08	14.18	4.32
1.5(127,2°C)	3	16.17	3.48	16.61	3.48	17.1	4.12	16.12	4.12	14.28	4.54
2(133.2)	3	16.39	3.66	16.79	3.52	17.17	4.34	16.34	4.34	14.39	4.69
1(120,1°C)	4	16.26	3.52	16.7	3.57	17.22	4.28	16.28	4.28	14.38	4.55
1.5(127,2°C)	4	16.41	3.68	16.93	3.7	17.31	4.36	16.36	4.36	14.5	4.78
2(133.2)	4	16.65	3.88	17.12	3.76	17.42	4.62	16.62	4.62	14.63	4.98
1(120,1°C)	5	16.68	3.94	17.32	3.94	17.61	4.66	16.66	4.66	14.78	4.98
1.5(127,2°C)	5	16.86	4.11	17.56	4.12	17.73	4.79	16.79	4.79	14.96	5.22
2(133.2)	5	17.11	4.36	17.75	4.22	17.96	5.12	17.12	5.12	15.14	5.44
1.5(127,2°C)	4	16.41	3.68	16.93	3.7	17.31	4.36	16.36	4.36	14.5	4.78
1.5(127,2°C)	4	16.41	3.68	16.93	3.7	17.31	4.36	16.36	4.36	14.5	4.78
1.5(127,2°C)	4	16.41	3.68	16.93	3.7	17.31	4.36	16.36	4.36	14.5	4.78

ISA = Índice de Solubilidad en agua (%); IAA = Índice de Absorción de agua (g agua/ g de muestra seca);

4.1.1 Índice de Solubilidad en agua (ISA)

Las quinuas cocidas en autoclave y deshidratadas por aire caliente, presentan valores de ISA como sigue: Negra Ccollana(16,08 – 17,12%), Negra Ayrampo (17,02- 17,96 %), Pasankalla(14,18 -15,14%), Amarilla Compuesta (16,04 – 17.11 %) y Rosada de Juli(16,39 – 17,75%).

Los coeficientes de regresión, representados a través de las ecuaciones, indican efectos cuadrático significativos ($p < 0,05$) para la presión de vapor saturado de cocción y tiempo, y efecto lineal significativo ($p < 0,05$), para la interacción presión y tiempo.

El modelo, con las variables independientes, son representados en la ecuaciones que se presentan a continuación y muestra la posibilidad del ISA ser estimado en función de la presión de vapor saturado y tiempo de cocción en autoclave, desde que las variables sean analizadas en las zonas de variación utilizadas en este estudio.

Quinua Rosada de Juli:

$$\text{ISA} = 16.7708 + 0.611667 \cdot P - 0.779167 \cdot t - 0.085 \cdot P^2 + 0.015 \cdot P \cdot t + 0.15375 \cdot t^2 \quad (4.1)$$

Quinua Amarilla Compuesta:

$$\text{ISA} = 16.7217 - 0.28 \cdot P - 0.538333 \cdot t + 0.17 \cdot P^2 + 0.04 \cdot P \cdot t + 0.1025 \cdot t^2 \quad (4.2)$$

A partir de los modelos obtenidos, se puede construir la superficie de respuesta para el ISA, representada en la Figura 4.1 [a) Quinua Rosada de juli, b) Quinua Amarilla Compuesta, c) Quinua Negra Ayrampo, d) Quinua Negra Ccollana y e) quinua Pasankalla respectivamente].

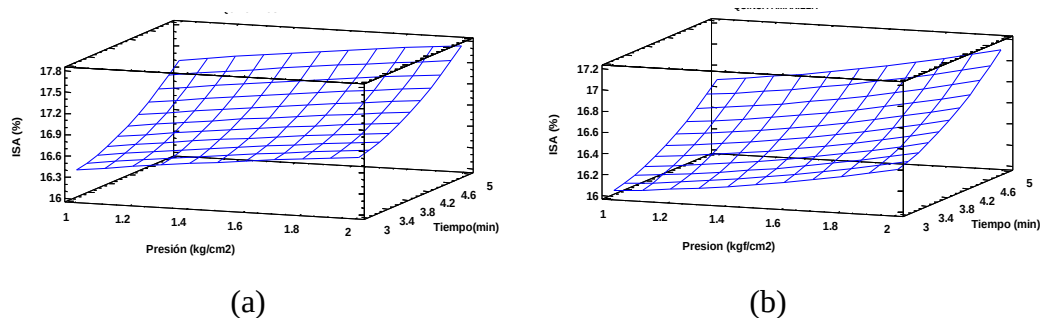


Figura 4.1: Resultado del efecto de la presión de vapor saturado de cocción y tiempo en la solubilidad del almidón de quinua: (a) Rosada de Juli y (b) Amarilla Compuesta.

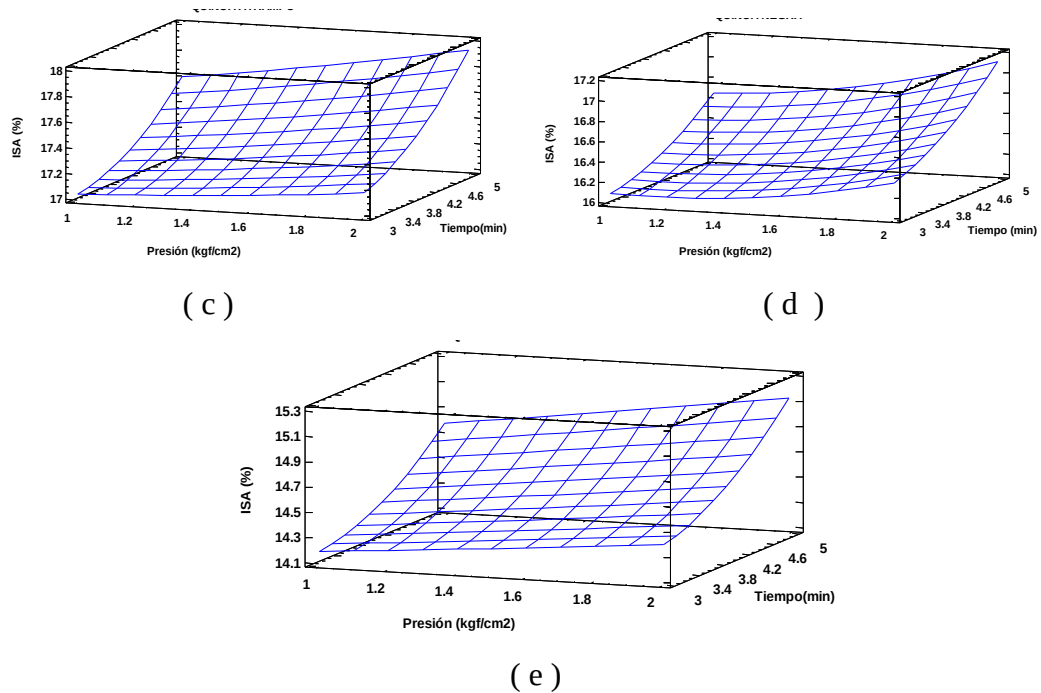


Figura 4.2: Resultado del efecto de la presión de vapor saturado de cocción y tiempo en la solubilidad del almidón de quinua: (c) Negra Ayrampo, (d) Negra Ccollana y (e) Pasankalla.

Quinua Negra Ayrampo:

$$ISA = 18,175 - 0,376667 \cdot P - 0,715 \cdot t + 0,07 \cdot P^2 + 0,1 \cdot P \cdot t + 0,1125 \cdot t^2 \quad (4.3)$$

Quinua negra Ccollana:

$$ISA = 17.4683 - 1.15667 \cdot P - 0.591667 \cdot t + 0.37 \cdot P^2 + 0.1 \cdot P \cdot t + 0.0975 \cdot t^2 \quad (4.4)$$

Quinua Pasankalla

$$ISA = 15.1208 - 0.0716667 \cdot P - 0.724167 \cdot t + 0.015 \cdot P^2 + 0.075 \cdot P \cdot t + 0.11875 \cdot t^2 \quad (4.5)$$

Donde:

ISA = Índice de solubilidad en agua (%)

P = Presión de vapor saturado (kgf/cm²)

t = Tiempo (min)

El ISA es generalmente utilizado en productos extruidos como indicador de la degradación de componentes moleculares, ahora en este estudio se está usando en una extrusión con vapor saturado (cocción en autoclave) que es un tipo de extrusión con abundante humedad. Indica, por ejemplo, el grado de conversión del almidón, midiendo la cantidad de polisacáridos solubles liberados de las macromoléculas componentes del almidón después del proceso de extracción, o sea, la sumatoria de los efectos de gelatinización, dextrinización y consecuente solubilización (Ding *et al.*, 2005).

En las figuras de 4.1, se observa que los valores de ISA están relacionados con la presión de vapor saturado y tiempo durante la cocción en autoclave, siendo que en todas las variedades de quinua en estudio, cuando la presión de vapor es mayor y tiempo mayor, los valores de ISA fueron mayores. La variedad que representó mayor ISA fue la variedad de quinua Negra Ayrampo (17,96%) y la variedad de quinua con menor valor fue la variedad de quinua Pasankalla (14,18%). Valls (1993) manifiesta que cuando el almidón se trata en agua caliente aparecen dos fracciones, el componente más soluble la amilasa que se disuelve y la amilopectina que permanece insoluble. En los cereales la amilasa viene a representar el 10-20% y la amilopectina el 90-80% del almidón total.

El ISA depende de la intensidad y tipo de reacciones que ocurren durante la cocción, influenciando la cantidad de moléculas solubles. Además de la gelatinización del almidón, que resulta en la liberación de amilosa y amilopectina, puede ocurrir también la dextrinización de los componentes del almidón y otras

reacciones que conducen la formación de compuestos de baja masa molecular (Riaz 2002).

Según Mercier (1975), durante la cocción por extrusión la estructura del almidón es rota y las regiones cristalinas son fundidas. Después, las altas condiciones de cizallamiento, temperatura y presión dentro del extrusor, resultan en una fragmentación molecular aumentando el índice de solubilidad en agua.

Los valores observados fueron superiores a la media obtenida por Peralbo (2015) en quinua cocida deshidratada antes de la extrusión (9,66%) y los obtenidos por Revelo (2010) en extruidos laminados de quinua y maíz, que variaron de 0,97 a 4,1% en condiciones de humedad de 20 a 22% y contenidos de quinua de 50 a 100%.

4.1.2 Índice de absorción de agua (IAA)

Las quinuas cocidas en autoclave y deshidratadas por aire caliente, presentan valores de IAA como sigue: Negra Ccollana(4,08- 5,12 g agua/100g ms), Negra Ayrampo (4,08 – 5,12), Pasankalla (4,32 – 5,44 g agua/100g ms), Amarilla Compuesta(3,31 – 4,36 g agua/100g ms) y Rosada de Juli(3,37- 4,22 g agua/100g ms).

Los coeficientes de regresión, representados en las ecuaciones, indican efectos cuadráticos significativos ($p < 0,05$) para la presión de vapor saturado de cocción y tiempo, y efectos lineales significativo ($p < 0,05$), para la interacción presión y tiempo.

El modelo, con las variables independientes, son representados en la ecuaciones que se presentan a continuación y muestra la posibilidad del IAA ser estimado en función de la presión de vapor saturado y tiempo de cocción en autoclave, desde que las variables sean analizadas en las zonas de variación utilizadas en este estudio.

Quinua Rosada de Juli

$$IAA = 3.76083 + 0.381667*P - 0.569167*t - 0.145*P^2 + 0.065*P*t + 0.09875*t^2 \quad (4.6)$$

Quinua Amarilla Compuesta

$$IAA = 4.06917 - 0.0183333*P - 0.655833*t + 0.085*P^2 + 0.035*P*t + 0.11625*t^2 \quad (4.7)$$

Quinua Negra Ayrampo

$$IAA = 5.46833 - 1.15667*P - 0.591667*t + 0.37*P^2 + 0.1*P*t + 0.0975*t^2 \quad (4.8)$$

Quinua negra Ccollana

$$IAA = 5.46833 - 1.15667*P - 0.591667*t + 0.37*P^2 + 0.1*P*t + 0.0975*t^2 \quad (4.9)$$

Quinua Pasankalla

$$IAA = 4.39917 + 0.465*P - 0.489167*t - 0.075*P^2 + 0.045*P*t + 0.09625*t^2 \quad (4.10)$$

Donde:

IAA = Índice de absorción de agua (g agua/100g ms)

P = Presión de vapor saturado (kgf/cm²)

t = Tiempo (min)

A partir de los modelos obtenidos, se puede construir la superficie de respuesta para el IAA, representada en la Figura 4.3 [variedades Negra Ccollana, Negra Ayrampo, Pasankalla, Amarilla Compuesta, Rosada de Juli].

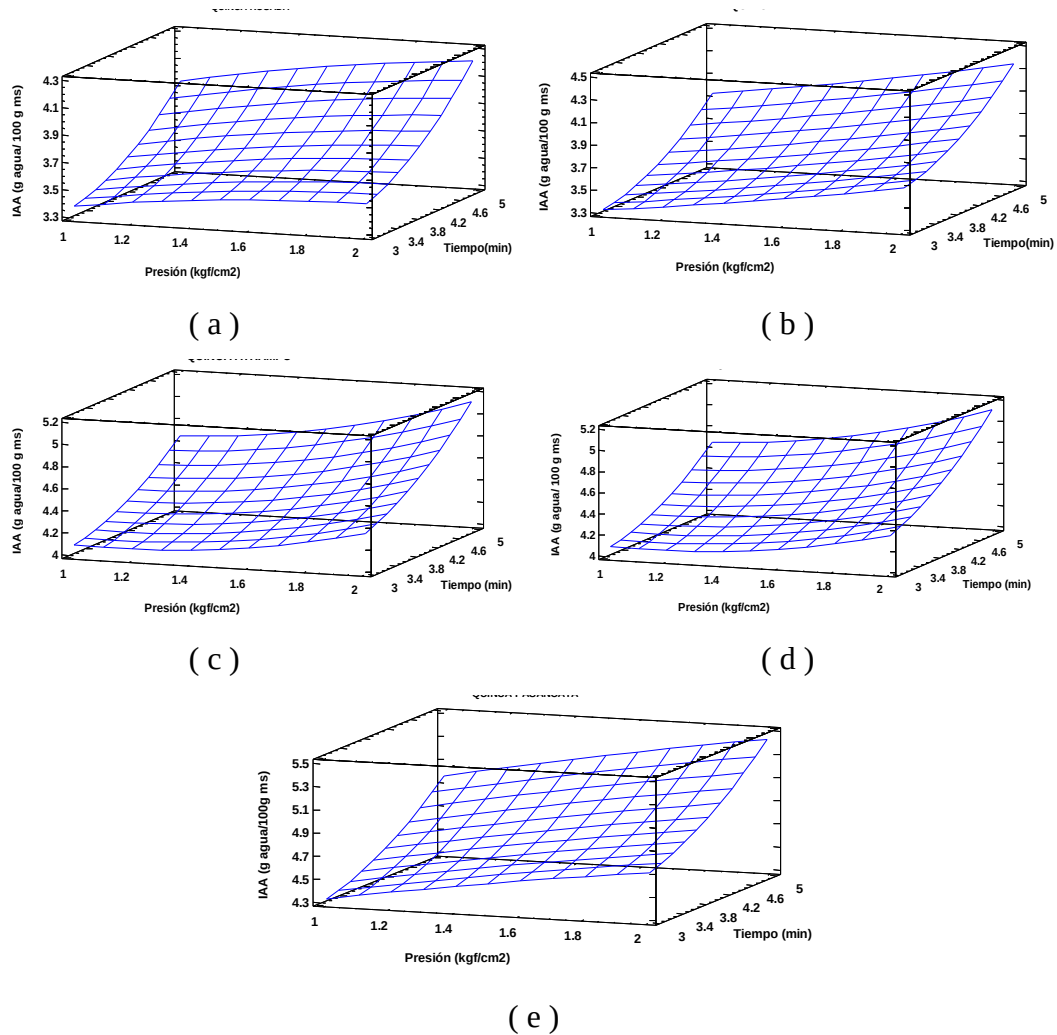


Figura 4.3: Resultado del efecto de la presión de vapor saturado de cocción y tiempo, en el Índice de absorción de agua (IAA) del almidón en las variedades: Rosada de Juli (a), Amarilla Compuesta (b), Negra Ayrampo (c) Negra Ccollana (d) y Pasankalla(e).

El máximo valor IAA se obtuvo con las variedades de quinua Pasankalla (5,44), sin embargo, las diferencias observadas a pesar significativo fueron muy pequeñas. Según Alvin *et al.*, (2002), IAA se relaciona con la capacidad de

absorción y retención de agua por los constituyentes de la materia prima. Durante la cocción a presiones elevadas y temperatura elevada el almidón es gelatinizado y las proteínas son desnaturalizadas. Los gránulos de almidón gelatinizado absorben más agua que las proteínas, debido a cambios estructurales. Estos se hinchan y la fragmentación disminuye la absorción de agua (Carvalho *et al.*, 2002; Borba *et al.*, 2005;).

El aumento de IAA en productos extruidos a base de almidón y proteína es causado probablemente por la exposición de grupos hidrofílicos, como también por el adelgazamiento y rotura de los enlaces del biopolímero, y que facilita la penetración del agua en las estructuras (Lustosa *et al.*, 2010).

En las condiciones de temperatura, vapor y tiempo de cocción en autoclave ejercen efecto sobre los IAA en los granos de quinua. Semejante resultado fue obtenido por Peralbo (2015) en la extrusión de harina de quinua. Lustosa *et al.*, (2010), en evaluación de influencia de los parámetros de extrusión en el IAA de harina de yuca y caseína. El coeficiente de variación (R^2) mostró un valor bajo (55%), este comportamiento puede ser debido a que los extruidos representan valores de IAA muy próximos entre sí.

4.2 RESULTADOS DE CINÉTICA DE SECADO PARA QUINUA COCIDA DESHIDRATADA

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las experiencias de deshidratado en un deshidratador de aire caliente realizadas a 60 °C de temperatura experimental y 4,5 m/s de velocidad de aire del secador, para diferentes variedades de quinua.

4.2.1 Deshidratado de quinua cocida

En las Figura 4.4, 4.5 y 4.6 se muestran las cinéticas de deshidratado para las variedades de quinua cocida: Rosada de Juli, Amarilla Compuesta, Negra Ayrampo, Negra Ccollana y Pasankalla. La velocidad del aire utilizada fue de 4,5 m/s. Las experiencias de deshidratado se realizaron al menos por duplicado para cada una de las variedades ensayadas.

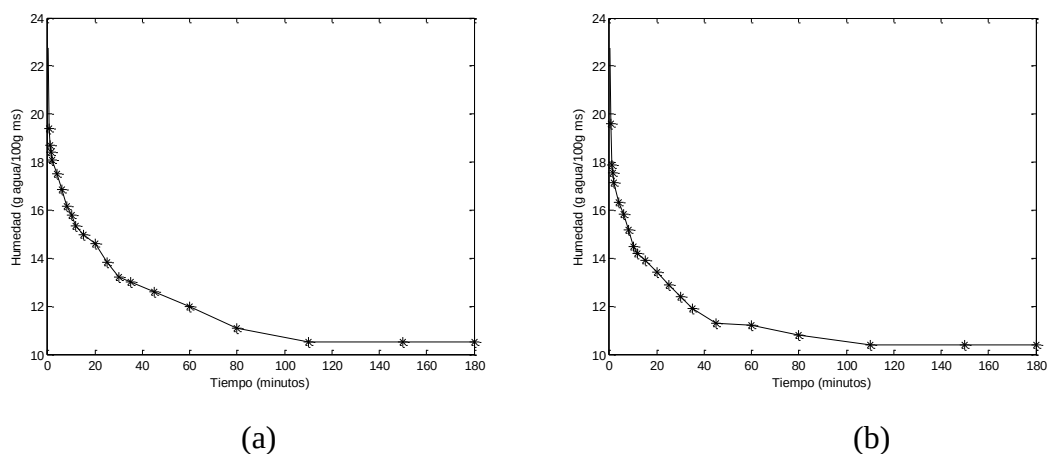


Figura 4.4: Resultado la variación de humedad durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en las variedades de quinua: (a) Rosada de Juli y (b) Amarilla Compuesta.

La humedad inicial de las quinuas cocidas fue de $22,5 \pm 0,06$ g agua/100g ms. El deshidratado de los productos transcurrió en el periodo de velocidad decreciente, por lo que la humedad crítica se correspondió con la humedad inicial (Karathanos y Belesiottis, 1997).

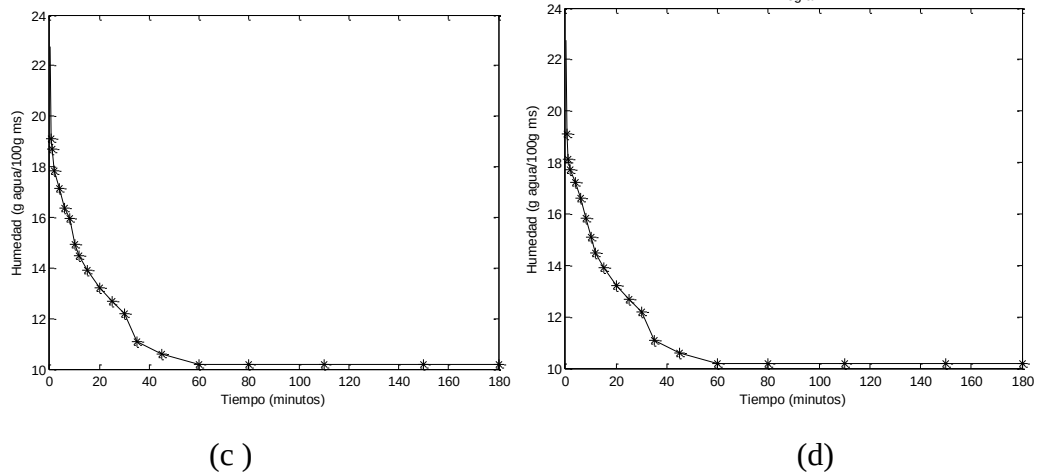


Figura 4.5: Resultado la variación de humedad durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en las variedades de quinua: (c) Negra Ayrampo y (d) Negra Ccollana.

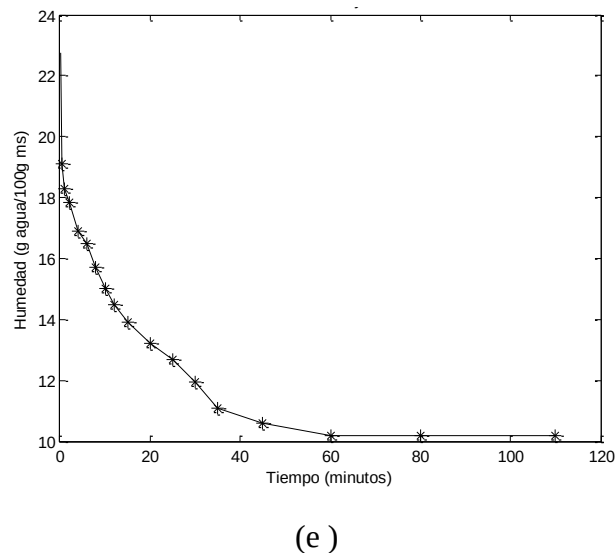


Figura 4.6: Resultado la variación de humedad durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, para la variedad de quinua Pasankalla (e).

La humedad ajustada en cada tiempo de secado, para la difusividad efectiva obtenida, y número de términos (n=5) es posible determinar con esta ecuación:

$$X_{ajustado} = (X_0 - X_e) * \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4L^2} D_{ef} * t \right] + X_e \quad (4.11)$$

A partir de las cinéticas de secado no se aprecia ningún efecto de las variedades de quinua en estas condiciones experimentales. Como se muestra en la Figuras 4.4, 4.5 y 4.6, las cinéticas obtenidas para las diferentes variedades presentan unas diferencias mínimas y atribuibles, en todo caso, a errores experimentales o a la propia heterogeneidad de la materia prima después de la cocción.

4.2.2 Difusividad del agua

Las cinéticas de deshidratado en secador de aire caliente para las variedades de quinua fueron modelizadas teniendo en cuenta la teoría difusional. Los modelos difusionales utilizados fueron similares. Esta similitud posiblemente debido a la geometría y composición de las variedades de quinua que hacen que el índice de solubilidad en agua y el índice de absorción de agua entre las variedades por el tiempo y presión de vapor de cocción en autoclave varié en valores no muy grandes. Por otro lado, las quinuas cocidas se modelizaron suponiendo que la piel de los quinuas es prácticamente impermeable a la transferencia de agua (Krokida *et al.*, 2003) y como consecuencia, considerando que su comportamiento se asemeja al de una lámina infinita de semiespesor igual al espesor real de la quinua, $L = 2$ mm. Pero en los resultados la hipótesis no muestra lo contrario, que no ofrece mucha resistencia a la difusión del vapor de agua, por las explicaciones antes realizadas.

En el modelo difusional planteado no se tuvo en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia (modelos SRE) ya que la velocidad de aire utilizada en las experiencias de lecho fue muy elevada (4,5 m/s). En estas condiciones de flujo, es habitual despreciar la resistencia externa a la transferencia de materia (López, 2011). Tanto para todas las variedades, solamente se identificó un único periodo difusional.

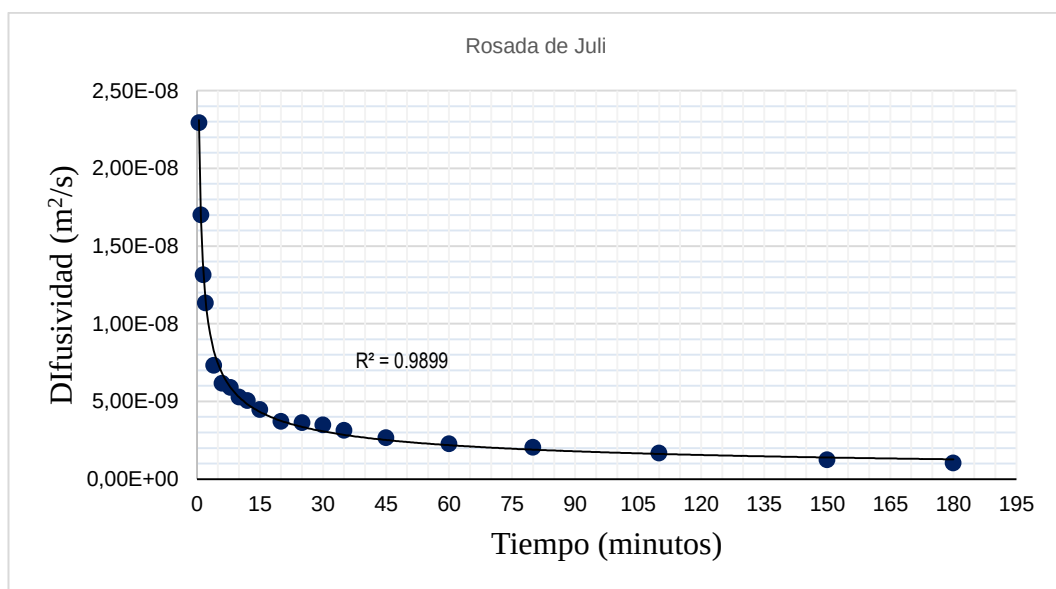


Figura 4.7: Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en la variedad de quinua Rosada de Juli.

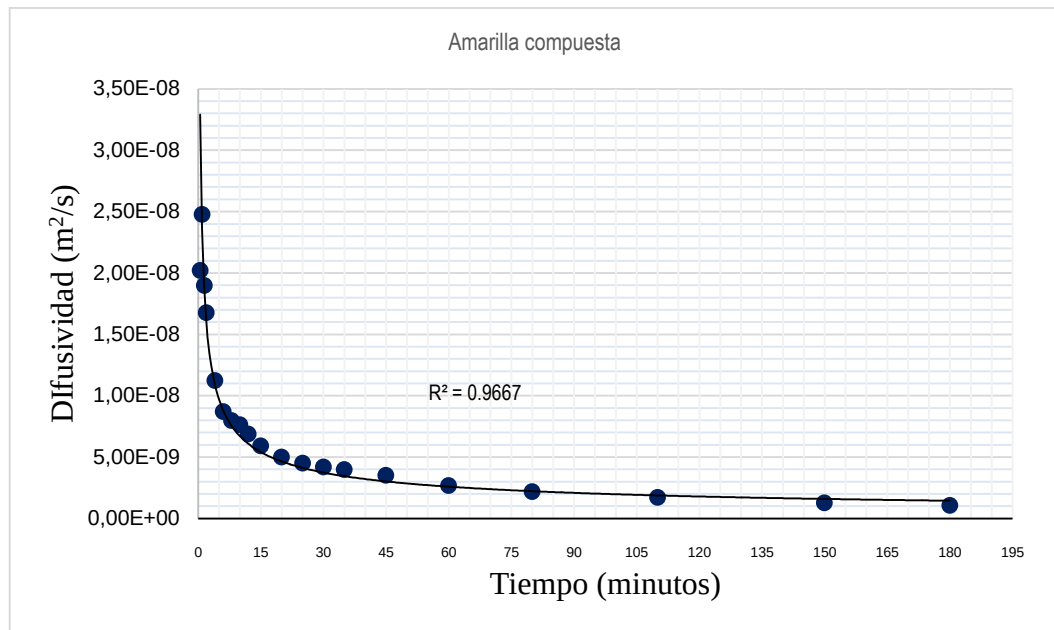


Figura 4.8: Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en la variedad de quinua Amarilla Compuesta.

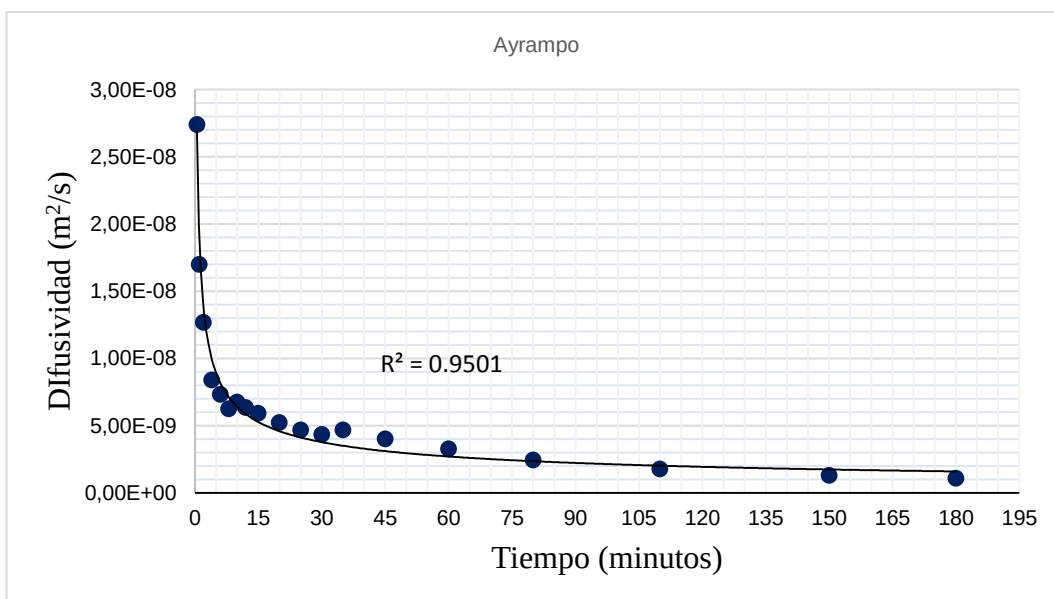


Figura 4.9: Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, en la variedad de quinua Negra Ayrampo.

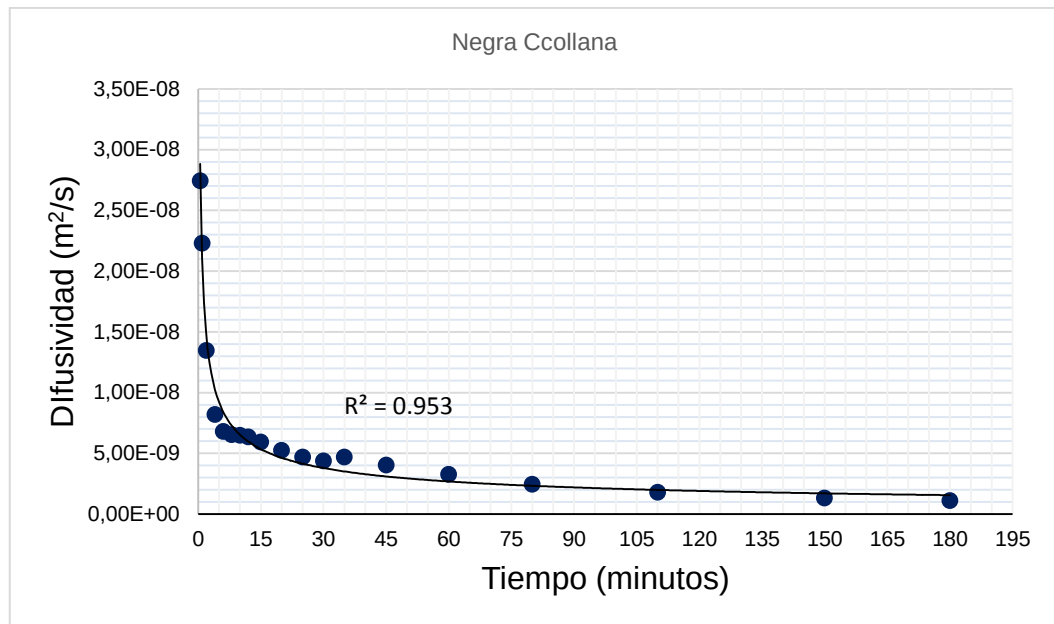


Figura 4.10: Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, para la variedad de quinua Negra Ccollana.

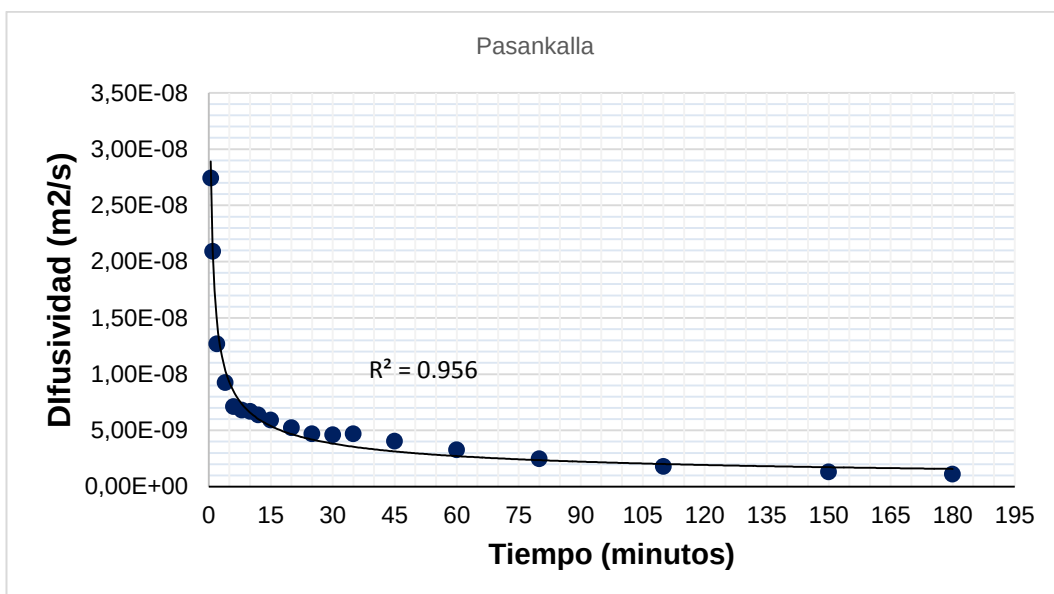


Figura 4.11: Resultado la variación de difusividad del agua durante el deshidratado a velocidad de aire a 4,5 m/s y temperatura de 60°C, para la variedad de quinua Pasankalla.

Los valores medios de difusividad efectiva identificados (Tabla 4.2) para la quinua Rosada de Juli ($5,13289 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), quinua Amarilla Compuesta ($5,23276 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), quinua Negra Ayrampo ($5,73395 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), quinua Negra Ccollana ($5,73395 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) y quinua Pasankalla ($10,48668 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), se encuentran dentro del intervalo considerado como más usual en los alimentos (10^{-10} y $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) (Zogzas *et al.*, 1996).

Tabla 4.2: Resultados de valores de difusividad efectiva para las variedades de quinua cocida durante la deshidratación con aire caliente.

Variedad de quinua	Difusividad efectiva (m^2/s),	r^2	E(%)
Quinua Rosada de Juli	$5,13289 \times 10^{-11}$	0,9899	22,2
Quinua Amarilla Compuesta	$5,23276 \times 10^{-11}$	0,9667	18,5
Quinua Negra Ayrampo	$5,73395 \times 10^{-11}$	0,9501	15,5
Quinua Negra Ccollana	$5,73395 \times 10^{-11}$	0,9530	15,3
Quinua Pasankalla	$10,48668 \times 10^{-11}$	0,9560	14,4

Evaluación estadística

Para la validación de los modelos fueron calculados el coeficiente de regresión (R), el porcentaje de confianza (P) y el error medio relativo, que es definido como la diferencia relativa entre los valores experimentales y los predichos (ecuación), siendo considerado predictivo el modelo que presenta valores de E menores que 10% (Fonseca, 2001).

$$E(\%) = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{X_{pred} - X_{exp}}{X_{exp}} \right| \quad (4.12)$$

Donde X_{pred} y X_{exp} representan los valores predichos por el modelo y los obtenidos experimentalmente, y N es el número de puntos experimentales. El r^2 , o coeficiente de determinación se calculó a través de la siguiente ecuación.

$$r^2 = 1 - \frac{\left(y_{\text{exp}(i)} - y_{\text{pred}(i)}\right)^2}{\left(y_{\text{exp}(i)} - y_m\right)^2} \quad \dots(4.13)$$

Donde y_i son los valores predichos y y_m el valor medio de los datos experimentales.

Los valores de los coeficientes de difusión presentados se encuentran dentro del rango, de 10^{-9} a 10^{-11} m^2/s que se suele encontrar publicado para diversos materiales biológicos (Perea-Flores y col., 2012). Sin embargo, no se encontraron en la bibliografía valores de D_{eff} determinados en condiciones similares a las de este trabajo. La mayoría de los autores trabajan dentro un rango de temperaturas de 25 a 110°C, y rangos de humedad inferiores.

Los valores de difusividad efectiva identificados para las variedades de quinua cocida no se vieron afectados de forma significativa ($p < 0.05$) para las condiciones de deshidratado.

La bondad de los ajustes obtenidos entre los valores experimentales y los calculados con los modelos difusionales planteados fue diferente para las variedades de quinua. En el caso de la quinua Pasankalla, los porcentajes de varianza explicada fueron en todos los casos superiores al 85,60 %. Es decir, en

este caso, el modelo de lámina infinita planteado describió muy bien los datos experimentales. Por el contrario, en el caso de la quinua rosada la varianza explicada fue en algunos casos inferior al 77,20 %, lo que sugiere una peor aproximación entre los valores experimentales y calculados por el modelo. Estos resultados no serían atribuibles al hecho de no considerar la resistencia externa en la modelización, ya que como anteriormente se ha indicado, en estas condiciones experimentales de elevada velocidad del aire constante (entre 3.5 m/s) la influencia de la resistencia externa es pequeña y a efectos prácticos despreciable. De cara a obtener modelos más adecuados para describir el comportamiento de la quinua cocida durante el deshidratado, sería necesario tener en cuenta el efecto de otras variables, como el encogimiento (López, 2011), que han sido consideradas en la bibliografía para la modelización de este producto. Sin embargo, el objetivo perseguido en este trabajo con la modelización de las cinéticas de secado fue el identificar el efecto de las variedades de quinua en los procesos de transferencia de materia, y no tanto desarrollar modelos muy precisos en la descripción de las cinéticas de deshidratado. Por esta razón, no se plantearon modelos difusionales más complejos para describir las cinéticas de secado de la quinua.

4.3 REHIDRATACIÓN

El resultado de la rehidratación de la quinua cocida deshidratada en agua al punto de ebullición, fue de aproximadamente de 3 minutos para toda las variedades en estudio (Rosada Juli, Amarilla compuesta, Negra Ayrampo, Negra Ccollana y Pasankalla) tal como es mostrado en la Tabla 4.3. La humedad máxima de rehidratación fue 56,50 a 57,08 en promedio.

Tabla 4.3: Rehidratación de la quinua cocida deshidratada, en agua a ebullición

Tiempo (min)	Humedad (%)				
	Rosada Juli	Amarilla compuesta	Negra Ayrampo	Negra Ccollana	Pasankalla
1	51,23	51,00	51,62	51,00	51,48
2	54,82	56,50	55,12	56,02	55,24
3	56,68	57,08	56,50	57,02	56,84
4	56,68	57,08	56,50	57,02	56,84

V. CONCLUSIONES

1. El efecto de la presión de vapor saturado ($1.0; 1.5 \text{ kg/cm}^2$) y tiempo de cocción (3,4 y 5 minutos), tiene un efecto directo en el índice de solubilidad (ISA) como sigue: Negra Ccollana (16,08 – 17,12%), Negra Ayrampo (17,02- 17,96 %), Pasankalla (14,18 -15,14%), Amarilla Compuesta (16,04 – 17.11 %) y Rosada de Juli (16,39 – 17,75%).
2. El efecto de la presión de vapor saturado ($1.0; 1.5 \text{ kg/cm}^2$) y tiempo de cocción (3,4 y 5 minutos), tiene un efecto directo en el índice de absorción de agua (IAA) como sigue: Negra Ccollana (4,08- 5,12 g agua/100g ms), Negra Ayrampo (4,08 – 5,12), Pasankalla (4,32 – 5,44 g agua/100g ms), Amarilla Compuesta(3,31 – 4,36 g agua/100g ms) y Rosada de Juli(3,37- 4,22 g agua/100g ms).
3. El valor de la difusividad efectiva durante la deshidratación ($T=60 \text{ }^\circ\text{C}$, velocidad 4,5 m/s) de la quinua cocida es: Negra Ccollana ($5,73395 \times 10^{-11}$), Negra Ayrampo ($5,73395 \times 10^{-11}$), Pasankalla ($10,48668 \times 10^{-11}$), Amarilla Compuesta($5,23276 \times 10^{-11}$) y Rosada de Juli($5,13289 \times 10^{-11}$) .

4. La calidad de rehidratación de las variedades fue de 3 minutos en promedio para todas las variedades, similar al grano de quinua cocida fresca.

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar estudio de vida útil en las condiciones de comercialización para este tipo de producto.
2. Realizar formulaciones instantáneas a base de este producto cocido deshidratado.
3. Realizar estudio económico del producto.
4. Realizar el estudio del extracto proteico de quinua en la formulación de alimentos infantiles.
5. Realizar el estudio de la transformación industrial del almidón de quinua como insumo de otras industrias, como glucosa, toffes, caramelos, etc.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Ahamed, N., Singhal, R., Kulkarni, P. y Pal, M. 1996. "Physicochemical and functional properties of *Chenopodium quinoa* starch". Botanical Research Institute, Lucknow. India.
- Aleixandre, A., & Miguel, M. 2008. Dietary Fiber in the Prevention and Treatment of Metabolic Syndrome: A Review. *Crit Rev Food Sci*, 48:905-912.
- Alvares. P.I.; Legues, P. 1986. Deshidratación de agroproductos: desarrollo de un modelo matemático para la interpretación de las curvas experimentales de secado. Departamento de ingeniería química. Universidad de Santiago de Chile.
- Alvim, I.D.; Sgarbieri, V.C.; Chang, Y.K. 2002. Desenvolvimento de farinhas mistas extrusadas à base de farinha de milho, derivados de levedura e caseína. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 22, n. 2, p. 170-176.
- Anderson, R.A.; Conway, H. F.; Pfeiffer, V. F.; Griffin, E. L. 1969." Gelatinization of corn grits by roll and extrusion-cooking". *Rev.Agrop. y Tec de Alim.*26 (4):552-564.
- Andrés, A.; Bilbao, C.; Fito, P. 2004. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*, 63, 71-78
- Ando, Hitomi; Chen, Yi Chun; Tang, Hanjun; Shimizu, Mayumi; Watanabe, Katsumi and Mitsunaga, Toshio. 2002. Food components in fractions of quinoa seed. *Food Science and Technology Research*. 8(1):80-84.
- AOAC. 2000. Official Methods of analysis of the Association of official Analytic Chemical of Official Analytical Chemists. USA. Editorial Board.
- Apak, Reşat; Gorinstein, Shela; Böhm, Volker; Schaich, Karen M.; Özyürek, Mustafa and Güçlü, Kubilay. 2013. Methods of measurement and evaluation of natural antioxidant capacity/activity (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry*. 85(5):957-998.
- Araujo, E.A.F. 2000. Estudo da cinética de secagem de fatias de banana nanica (*Musa acuminiata* var. Cavendish) osmoticamente desidratadas. 87p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de

Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- Araujo Consuelo de Vizcarrondo, Alicia Mariela Rincón, Fanny Padilla 2004. Caracterización del almidón nativo de *Dioscorea bulbifera* L. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S00046222004000200016&script=sci_arttext.
- Arzapalo Quintoa Doyla, Huamán Cóndora Katty, Quispe Solano Miguel y Espinoza Silvab Clara. 2015. Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) negra collana, pasankalla roja y blanca junín. Rev Soc Quím Perú. 81(1).
- Ascheri, J. L.; Spehar, C. R.; Nascimento, N. E. 2002. Caracterización química comparativa de harinas instantaneas por extrusión de quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*), maíz y arroz. Alimentaria, Madrid, v. 39, n.331, p. 82-89.
- Bencini, M. A. 1986. Functional properties of drum-dried chickpea flours. J. Food Sci. 51: 1518-1521.
- Biliaderis C, G. 1980. Structures and phase transitions of starch polymers. In *Polysaccharide association structures in food*. Ed. by Reginald H. Walter. Marcel Dekker, New York.
- Bicudo, M. O. P; Vasques, E. C.; Zuim, D. R.; Candido, L. M. B. 2012. Elaboração e caracterização de bebida fermentada à base de extrato hidrossolúvel de quinoa com polpa de frutas. Boletim CEPPA, v. 30, n. 1, p. 19-26.
- Biliaderis, C.G., 1991. The structure and interactions of starch with food constituents. Can. J. Physiol. Pharmacol., 69, 60-78.
- Bou Rached Lizet, Consuelo A. de Vizcarrondo, Alicia M. Rincón, Fanny Padilla. 2006 “Evaluación de harinas y almidones de mapuey (*Dioscorea trifida*), variedades blanco y morado” Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0004-06222006000400010&script=sci_arttext.

- Borba, A. M. 2005. Efeito de alguns parâmetros operacionais nas características físicas, físicoquímicas e funcionais de extrudados da farinha de batata-doce. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Brady, K.; Ho, C.; Rosen, R. T.; Sang, S.; Karwe, M. V. 2007. Effects of processing on the nutraceutical profile of quinoa. **Food Chemistry**, v. 100, n. 4, p. 1209-1216.
- Brennan, J.G.; Wang, N. 1980. A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. *Journal of Food Engineering*, v.24, p.47-60.
- Brod, F.P.R. 2003. Avaliação de um secador vibro-fluidizado. 335p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Calderelli, V. A. S.; Benassi, M. T.; Visentainer, J. V.; Matioli, G. 2010. Quinoa and flaxseed: potential ingredients in the production of bread with functional quality. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 53, n.4, p. 981-986.
- Capriles, V.D.; Arêas, J.A.G. 2005. Desenvolvimento de “snacks” com teores reduzidos de gordura saturada e de ácidos graxos trans. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.25, n.2, p.363-369.
- Carvalho, R. V.; Ascheri, J. L. R; Cal-Vidal, J. 2002. Efeito dos parâmetros de extrusão nas propriedades físicas de pellets (3G) de misturas de farinhas de trigo, arroz e banana. *Ciência e Agrotecnologia*. Lavras, v.26, n. 5, p. 1006-1018.
- Cervilla, Natalia Soledad; Mufari, Jesica Romina; Calandri, Edgardo Luis y Guzman, Carlos Alberto. 2012b. Determinación del contenido de aminoácidos en harinas de quinoa de origen argentino. *Evaluación de su calidad proteica. Actualización en Nutrición*. 13(2):107-113.
- Chambi B. 2005. Variabilidad genética del grano de 190 accesiones de quinua (*Chenopodium quinoa Willd*). del Banco Nacional de Granos Altoandinos. Tesis de Grado. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia. 125 p.

- Chevarria-Lazo, Marco; Bazile, Didier; Dessauw, Dominique; Louafi, Selim; Trommetter, Michel and Hocde, Henri. 2014. Los sistemas que regulan el intercambio de los recursos genéticos: importancia para el acceso, la circulación y la innovación en el caso de la quinua. En Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013. (pp. 95-123). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Santiago de Chile, Chile - Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Montpellier, Francia.
- Chuang, G.C.C.; Yeh, A.I. 2004. Effect of screw profile on residence time distribution and starch gelatinization of rice flour during single screw extrusion cooking. *Journal of Food Engineering*, v. 63, p. 21-31.
- Comai, S., Bertazzo, A., Bailoni, L., Zancato, M., Costa, C.V.L. E Allegri, G. 2007. The content of proteic and nonproteic (free and protein-bound) tryptophan in quinoa and cereal flours. *Food Chemistry* 100(4): 1350-1355.
- Chichester, C., 1982, "Phytates in legumes and cereals", Academic Press, New York, USA, pp. 1-75.
- Crank, J. The mathematics of diffusion, 2a ed. S.I. Claredon Press Oxford, 1975. 414p.
- De Boland AR., Garner GB., O'Dell BL. 1975. Identification and properties of phytate in cereals grains and oilseed product. *J. Agric. Food Chem.* 23:1186-1189.
- Degáspari, C. H.; Silva, N. M. 2010. Desenvolvimento de aplicações tecnológicas na forma pré-gelatinizada para grãos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). **Visão Acadêmica**, v.11, n.1.
- Diaz-Batalla L, Widholm JM, Fahey GC Jr, Castaño-Tostado E. Paredes-Lopez O., 2006. Chemical components with health implications in wild and cultivated Mexican common bean seeds (*Phaseolus vulgaris* L.). *J Agric Food Chem.*, 54(6):2045-52.
- Ding, Q; Ainsworth, P., Plunkett, A.; Tucker, G.; Marson, H. 2005. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory

- characteristics of ricebase expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, v.66, p.283-289.
- Dini, I.; Tenore, G.C.; Trimarco, E. E Dini, A. 2006. Two novel betaine derivatives from Kancolla seeds (*Chenopodiaceae*). *Food Chemistry*, 98(2): 209-213.
- El Diario de Economía y Negocios de Perú, Gestión (20 de enero del 2015).
- Elgeti, D.; Nordlohne, S. D.; Föste, M.; Besl, M.; Linden, M. H.; Heinz, V.; Jekle, M.; Becker, T. 2014. Volume and texture improvement of gluten-free bread using quinoa white flour. *Journal of Cereal Science*, v. 59, p. 41-47.
- Egli I.M. 2001. Traditional food processing methods to increase mineral bioavailability from cereal and legume based weaning foods. Tesis doctoral. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich (Suiza).
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011. Underutilized Andean food crops. Latin América and the Caribbean, Rome, Italy.
- FAO. 2014. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recetario internacional de la quinua: tradición y vanguardia. E-ISBN 978-92-5-308058-8FAO. 2014. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recetario internacional de la quinua: tradición y vanguardia. E-ISBN 978-92-5-308058-8 (PDF). <http://www.fao.org/docrep/019/i3525s/i3525s.pdf>
- FAO. 2013 b .Food Outlook: Bianual Report on Global Food Market.. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/018/al999e/al999e.pdf>>. Acesso em: 20/01/2014.
- Febles, C., 1998, “Estudio del contenido de fitatos en derivados de cereales de consumo en Canarias”, Proyecto de titulación previo la obtención del título de Doctora en Farmacia, Universidad de La Laguna, Tenerife, España, p. 1.
- Fellows, P. J. 2006. Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática. 2ª ed., Porto Alegre: Artmed, 602p.

- Fito, P., & Chiralt, A. 2001. Food matrix engineering: the use of the waterstructure- functionality ensemble in dried food products development. *Food Science and Technology International*, 9, 153-156.
- Fischer, Susana; Wilckens, Rosemarie; Jara, Jorge and Aranda, Mario. 2013. Controlled water stress to improve functional and nutritional quality in quinoa seed. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*. 12(5):457-468.
- Fonseca, J. 2001. Análise de variância. En *Estatística matemática*. Vol.2 Ed.
- Gabriel Julio, Luna Nayra, Vargas Amalia, Magne Yuri, Angulo Ada, La Torre Jaime y Bonifacio Alejandro. 2012. Quinoa del Valle (*Chenopodium quinoa Willd.*): Fuente valiosa de resistencia genética al mildiu (*Peronospora farinosa Willd.*). *Journal of the Selva Andina Research Society*; 3(2):27.
- Geankoplis, C.J. 1998. Secado de materiales de proceso. En: *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (3th Ed.) Compañía Editorial Continental. México, pp 579-634.
- Gómez, M.E.B. 1997. Produção de “snacks” de segunda geração, a partir de misturas de farinhas de arroz e batata – doce, por extrusão termoplástica. 1997. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro.
- Gonzáles, J. R; Torres, R.L; De Greef, D.M. 2002. Extrusión-cocción de cereales. *Boletim da SBCTA*, Campinas, v. 36, n. 2, p. 104-115.
- González, R.J.; Torres, R.L.; De-Greef, D.M.; Gordo, N.A. 1986. “Evaluación de almidón de maíz precocido por extrusión-cocción”. *Revista Agroquímica y Tecnología de Alimentos*. 26(4): 552-564.
- González, R.J.; Torres, R. L.; De Greef, D.M. 2002. “Extrusión-Cocción de Cereales”. *Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 36(2): 104-115.
- González, Juan A.; Konishi, Yotaro; Bruno, Marcela; Valoy, Mariana and Prado, Fernando E. 2012. Interrelationships among seed yield, total protein

- and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. Journal of the Science of Food and Agriculture. 92(6):1222-1229.
- Gorbitz A.y Luna R., Ministerio de Agricultura, Boletín N° 54
- GREP-AEDN. 2011. Nueva pirámide de la alimentación saludable. <http://www.consumer.es/web/es/alimentacion/tendencias/2011/04/01/199776.php>
- Haas, G.J., Prescott, H.E. & Cante, C.J. (1974) On the rehydration and respiration of dried and partially dried vegetables. Journal Food Science, 39, 681-684.
- Hashimoto, J. M.; Grossmann, M. V. E. 2003. Effects of extrusion conditions on quality of cassava bran/cassava starch extrudates. International Journal of Food Science and Technology, v. 38, n. 5, p. 511-517.
- Hogekamp S. Schubert H. 2003. Rehydration of food powders, J Food Science and Technol Internat; 9 (3): 223-235. [Links]
- Hurrell RF. 2004. Phytic acid degradation as a means of improving iron absorption. Int. J. Vitam. Nutr. Res., 74 (6): 445-452. Hurrell RF. (2004). Phytic acid degradation as a means of improving iron absorption. Int. J. Vitam. Nutr. Res., 74 (6): 445-452.
- IOM. 2011. (Institute of Medicine). Committee on Leading Health Indicators for Healthy People 2020. In: Leading health indicators for healthy people 2020: Letter report. Washington, DC: The National Academies Press.
- Jancurová, Michala; Minarovičová, Lucia and Dandar, Alexander. 2009. Quinoa - a review. Czech Journal of Food Sciences. 27(2):71-79.
- Jiménez de Erramouspe, Patricia Liliana; Armada de Romano, Margarita y Gómez-Molina, Silvia Eugenia. 2010. Caracterización química y estructural de semillas de quinua variedad Cica. En Resúmenes del III Congreso Mundial de la Quinoa. 16-19 Marzo. Oruro, Bolivia. 8 p.
- Karathanos, V.T.; Villalobos, G.; Saravacos, G.D. 1990. Comparison of two Methods of Estimation of the Effective Moisture Diffusivity from Drying Data. Journal of food Science. Vol 55: 218.

- Koziol, M., 1990, Composicion química de la quinua. En “Quinua, hacia su cultivo comercial”. Christian Wahli ed., LATINRECO, Quito.
- Koziol, M.J. 1992. Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*). Journal of Food Composition and Analysis. 5(1)35-68.
- Koziol, M. 1993. In.: Janick, J., Simon, J. (Eds.). Quinoa: A Potential New Oil Crop. New Crops. Wiley, New York, p.328-336.
- Krokida, M. K., V.T. Karathanos, Z.B. Maroulis y D. Marinos-Kouris. 2003. Drying kinetics of some vegetables, Journal of Food Engineering; 59(4), 391-403. [Links]
- Krokida M.K. Marinos-Kouris D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products, J Food Engineering; 57: 1-7. [Links]
- Krokida M.K. Maroulis Z.B. 2001. Structural properties of dehydrated products during rehydration, International J Food Science Technol; 36:529-538. [Links]
- LABUZA, T. P. (1982) Shelf-life dating of foods. Connecticut, Food & Nutrition Press, INC.
- Labuza, T.P. (1984). Aplicacion of chemical kinetics to deterioration of foods. Journal of Chemical Education 61(4): 348-358.
- Larico Vera Juan, Alonso Astete Félix y Leoncio Tacora Robinson. 2014. Perfil de ácidos grasos en granos tres cultivares de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) sometidos a tres tipos de procesamiento. Rev. Investig. Altoandin. 2014; Vol 16 N° 1: 13 – 20.
- Lescano J.L.1994. Genética y mejoramiento de cultivos alto andinos. Programa Interinstitucional de WaruWaru, Convenio INADE/PELTCOTESU. Puno, Perú. 45 p.
- Lewicki PP. 1998. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue propertie: a review, Internat J Food Properties; 1: 1-22. [Links]
- Lewicki P.P. 1998. Some remarks on Rehydration of dried foods, J Food Engineering; 36: 81-87. [Links]

- Lewis, W. K. 1921. The rate of drying of solids materials. The Journal of Industrial and Eng. Chem., 13(5): 427-432.
- Lewis, W. K. 1921. The rate of drying of solids materials. The Journal of Industrial and Eng. Chem., 13(5): 427-432.
- Liu, R.H. 2007. Whole grain phytochemicals and health. J Cereal Sci, 46:207-219.
- López, A. 2011. Secado convectivo de ajo (*Allium Sativum*, l.) con condiciones variables de operación, Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca, México.
- Lustosa, B. H. B.; Leonel, M.; Mischan, M. M. 2010. Parâmetros de extrusão na produção de snacks de farinha de mandioca enriquecidos com caseína. Ciências Agrárias, Londrina, v. 31, n. 1, p. 109-126.
- Mc Minn y Magee. (1997b) Physical characteristics of dehydrated potatoes-partII. Journal of Food Engineering 33, 49-55.
- Magallanes, M. 2009. Farinha Instantânea de Quinoa (on line). Embrapa Transferência de Tecnologia. Disponível em: <http://hotsites.sct.embrapa.br/proeta/tecnologias/processos/sudeste/farinha-instantanea-de-quinoa-e-maranto>. Acessado em 03 de dezembro.
- Marabi A. Dilak C. Shah J. Saguy I.S. 2004. Kinetic of solids leaching during rehydration of particulate dry vegetables, J Food Science; 69: 3. [Links]
- Marquart, L., Asp, N.G., & Richardson, D.P. 2004. Whole grain health claims in the United States, United Kingdom and Sweden. In: Dietary fibre – Bio-Active Carbohydrates for Food and Feed. Van der Kamp, J.W., Asp, N.G., Jones, J.M. and Schaafsma, G., Eds., pp. 39-57. The Netherlands: Wageningen Academic Publishers.
- Marsh, Kate A.; Munn, Elizabeth A. and Baines, Surinder K. 2013. Is a vegetarian diet adequate?. Protein and vegetarian diets. The Medical Journal of Australia. 199(4, Suppl. republished): S7-S10.
- Martínez-Valverde, Isabel; Periago, María Jesús y Ros, Gaspar. 2000. Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 50(1):5-18.

- Matos, A., y Sánchez, F. 2011. “Determinación del rendimiento de almidón a partir en tres accesiones de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), Pasankalla, Salcedo INIA y Kancolla”. Universidad Peruana Unión, Tercer encuentro de Investigación Universitaria, Lima-Perú.
- Mercier, C.; FEILLET, P. 1975. Modification of carbohydrate components by extrusioncooking of cereal products. *Cereal Chemistry*. v. 52, n. 3, p. 283-296.
- Meeker, W. Q., & Escobar, L. A. (1998). *Statistical methods for reliability data*. New York: John Wiley & Sons.
- Ministerio de agricultura del Perú, estadísticas anuales. 2008. Disponible en www.minag.gob.pe
- Miranda, Margarita; Vega-Gálvez, Antonio; Martínez, Enrique; López, Jéssica; Rodríguez, María José; Henríquez, Karem and Fuentes, Francisco. 2012a. Genetic diversity and comparison of physicochemical and nutritional characteristics of six quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes cultivated in Chile. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* (Brazil). 32(4):835-843.
- Miranda, Margarita; Vega-Gálvez, Antonio; Martínez, Enrique A.; López, Jéssica; Marín, Rosa; Aranda, Mario and Fuentes, Francisco. 2013. Influence of contrasting environments on seed composition of two quinoa genotypes: nutritional and functional properties. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 73(2):108-116.
- Mondragón M., 2004 Tesis: “Estudio Comparativo de Cambios Estructurales y Funcionales en Almidón de Maíz Nixtamalizado” Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada – Unidad Altamira Instituto Politécnico Nacional.
- Montoya L., Martínez L.,Peralta J., 2005. Análisis de variables estratégicas para la conformación de una cadena productiva de quinua en Colombia. Investigación realizada por el Grupo de Investigación BIOGESTION.www.biogestion.unal.edu.co
- Mujica, A., Izquierdo J., Marathe J.P. 2001. Origen y descripción de la quinua. En Quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.)-Ancestral cultivo andino,

- alimento del presente y futuro (Mujica A., Jacobsen S.-E., Izquierdo J., Marathe J., Editores). FAO, UNA-Puno, CIP, Santiago, Chile, 9-29.
- Nelson, W. (1990). Accelerated testing. Statistical models, test plans and data analyses. New York: John Wiley & Sons.
- Niyini, N., y Markakis, P., 1986, "Phytases", en Graf, E., "Phytic Acid: Chemistry and Applications", Pilatus Press, Minneapolis, pp. 101-117.
- Nowak, Verena; Du, Juan and Charrondi re, U. Ruth. 2015. Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*). (In press).
- NTP (INDECOPI) 205.027: 1986. HARINA DE TRIGO PARA CONSUMO DOMÉSTICO Y USO INDUSTRIAL.
- Oshodi, J.E. 1999. The construction of an Africentric sentence completion test to assess the need for achievement. Journal of Black studies, 30, 216-231.
- Okos M.R., Narsimhan, G., Singh, R.K. & Weitnauer, A. C. (1992) Food dehydration. In Handbook of Food Engineering, eds. D.R. Heldman & D.B.Lund, pp.437-562, Marcel Dekker Inc, New York. 7.
- Padrón Pereira1 Carlos Alberto, Oropeza González Rafael Antonio, Montes Hernández Adriana Isabel. 2015. Semillas de quinua (*Chenopodium quinoa Willdenow*): composición química y procesamiento. Aspectos relacionados con otras áreas. Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos. 5 (2): 166-218. Julio-Diciembre, 2014 .<http://www.rvcta.org> ISSN: 2218-4384 (versión en línea)
- Padrón Pereira1 Carlos Alberto, Oropeza González Rafael Antonio, Montes Hernández Adriana Isabel. 2015. Semillas de quinua (*Chenopodium quinoa Willdenow*): composición química y procesamiento. Aspectos relacionados con otras áreas. Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos. 5 (2): 166-218. Julio-Diciembre, 2014 <http://www.rvcta.org>
- Pagamunici, L. M.; Gohara, A. K.; Souza, A. H. P.; Bittencourt, P. R. S.; Torquato, A. S.; Batiston, W. P.; Gomes, S. T. M.; Souza, N. E.;

- Visentainer, J. V.; Matsushita, M. 2013. Using chemometric techniques to characterize gluten-free cookies containing the whole flour of a new quinoa cultivar. *Journal of The Brazilian Chemical Society*, v. 00, n. 00, p. 1-10.
- Prabhanajan, D. G., Ramaswamay, H.S. & Raghavan, G.S.V. (1995) Microwave-assisted air drying of thin layer carrots. *Journal of food engineering*, 25, 283-293
- Peiretti, P.G.; Gai, F. and Tassone, S. 2013. Fatty acid profile and nutritive value of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) seeds and plants at different growth stages. *Animal Feed Science and Technology*. 183(1-2):56-61.
- Peralbo Mora David Marcelo. 2015. ALIMENTO TIPO “SNACK” EXPANDIDO A BASE DE QUINOA (*Chenopodium quinoa Willdenow*). VIÇOSA MINAS GERAIS – BRASIL. Para obtenção do título de Magister Scientiae.
- Peralta, E.; Mazon, N.; Murillo, A.; Villacres, E.; Rivera, M.; Subia, C. 2009. Catálogo de variedades mejoradas de granos andinos: Chocho, quinoa y amaranto, para la sierra ecuatoriana. Publicacion Miscelanea N° 151. Programa Nacional de Leguminosas y Granos Andinos. Estacion Experimental Santa Catalina, INIAP. Quito Ecuador.
- Perea-Flores, M.J., Garibay-Flebes, V., Chanona-Pérez, J.J., Calderón-Domínguez, G., Méndez-Méndez, J.V., Palacios-González, E., Gutiérrez-López, G.F. 2012. Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. *Industrial Crops and Products*, 38, 64-71.
- Perry, R.H.; Chilton C. 1984. Manual del Ingeniero Químico. Quinta edición. USA.
- Poutanen, K., Kervinen, R., Kamp, J.W. van der, & Poms, Roland. 2010. Enhancing health benefits of cereal foods. Results, perspectives, challenges. Edita, Finland: Edita Prima Oy.
- Prakash, D.; Pal, M. 1998. *Chenopodium*: Seed protein, fractionation and aminoacid composition. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 49

- Prego, Imelda, S. Maldonado & M.Otegui. 1998. Seed structure and localization of reserves in *Chenopodium quinoa*. *Annals of Botany* 82:481-488. Article N°12. Bogota.
- Quiroga-Ledezma, Carla y Escalera-Vásquez, Ramiro. 2010. Evaluación de la calidad nutricional y morfología del grano de variedades amargas de quinua beneficiadas en seco, mediante el novedoso empleo de un reactor de lecho fluidizado de tipo surtidor. *Investigación & Desarrollo*. 10:23-36. Quiroga-Ledezma, Carla y Escalera-Vásquez, Ramiro. 2010. Evaluación de la calidad nutricional y morfología del grano de variedades amargas de quinua beneficiadas en seco, mediante el novedoso empleo de un reactor de lecho fluidizado de tipo surtidor. *Investigación & Desarrollo*. 10:23-36.
- Ranhotra, G.S.; Gelroth, J.A.; Glaser, B.K.; Lorenz, K.J. and Johnson, D.L. 1993. Composition and protein nutritional quality of quinoa. *Cereal Chemistry*. 70(3):303-305.
- Rastogi N.K. Niranjana K. 1998. Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple, *J Food Science*; 63 (3): 508-511. [Links]
- Rastogi N.K. Nayak C.A. Raghavarao M.S. 2004. Influence of osmotic pre-treatments on rehydration characteristics of carrots, *J Food Engineering*; 65: 287-292. [Links]
- Repo-Carrasco, R., C. Espinoza y S.E. Jacobsen. 2001. Valor Nutricional y Usos de la Quinoa (*Chenopodium quinoa*) y de la Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). In, *Memorias* (eds. S.-E. Jacobsen & Z. Portillo). Primer Taller Internacional sobre Quinoa-Recursos Genéticos y Sistemas de Producción, 10-14 May, UNALM. Lima, Peru, 391-400
- Repo-Carrasco, R.; Espinoza, C.; Jacobsen, S. E. 2003. "Nutritional value and use of the Andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*)". In: *Food Review International*.
- Repo de Carrasco, Ritva y Encina-Zelada, Christian René. 2008. Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos fenólicos de cereales andinos: quinua (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium*

pallidicaule) y kiwicha (*Amaranthus caudatus*). Revista de la Sociedad Química del Perú. 74(2):85-99.

RESOLUCIÓN MINISTERIAL N° 451-2006-SA/DM.

Riaz N M. 2005, Extruded snacks, In: Y. H. Hui. Handbook of Food Science Technology and Engineering, 4, CRC Press :1-8.

Rincón, I., y Col., 2009. “Almidón De Arracacha Como ingrediente funcional para la elaboración de compotas”, Propuesta, Disponible en: www.slideshare.net/invariva/almidones.

Rojas, W., M. Pinto, JL. Soto y E. 2010. “Granos Andinos: Avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, cañahua y amaranto en Bolivia” Biodiversity International, Roma-Italia.

Rubio Zamorano Yolanda Paola. 2005. Extracción de aceite de quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) y su caracterización de dos ecotipos provenientes del secano costero de la región vi de Chile”. Tesis para obtener el título de Ingeniero de Alimentos. Universidad de Chile. Chile.

Rojas, Wilfredo; Pinto, Milton; Alanoca, Carolina; Gómez-Pando, Luz; León-Lobos, Pedro; Alercia, Adriana; Diulgheroff, Stefano; Padulosi, Stefano y Bazile, Didier. 2014. Estado de la conservación *ex situ* de los recursos genéticos de quinua. En Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013. (pp. 65-94). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Santiago de Chile, Chile - Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Montpellier, Francia.

Rojas, Wilfredo y Pinto, Milton. 2013. La diversidad genética de quinua de Bolivia. En Memoria del Congreso Científico de la Quinoa. (pp. 77-91). 14-15 Junio. La Paz, Bolivia.

Ruiz, R.G.; Price, K.R.; Arthur, A.E.; Rose, M.E.; Rhodes, M.J.; Fenwick, R.G. 1996. Effect of soaking and cooking on the saponin content and composition of chickpeas (*Cicer arietinum*) and lentils (*Lens culinaris*). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 44, 1526-1530.

- Salcines Minaya, Fernando. 2009. Tesis Doctoral Cadena Agroalimentaria de la Quinoa y la Maca Peruana y su Comercialización en el Mercado Español. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Sanchez Bravo, Fernando. 2013 “Proyecto de factibilidad de inversión privada para la instalación de un semillero de quinoa” Sierra exportadora. Perú.
- Sandberg, A., 1991, “The effect of Food Processing on Phytate Hydrolysis and Availability of Iron and Zinc”, en “Nutritional and Toxicological consequences of Food Processing”, New York, USA, pp. 499-507.
- Sanjuán N. Andrés J. Clemente G. Mulet A. 2001. Modeling of the Rehydration process of broccoli florets, *European Food Res Technol*;212:449-453. [Links].
- Saravacos, G.; Rouzeous, G.S. 1984. Diffusivity of moisture in air-drying of starch gels. In: *Engineering and food*, London and New York: ed. Brian M. McKenna, Elsevier Applied Science Publishes, v.1, p. 493-507.
- Secretaría de Seguridad Alimentaria y Nutricional (SESAN). 2013. Investigación sobre el cultivo de la quinoa o *Chenopodium Quinoa*. Gobierno de Guatemala.
- Sherwood, T.K. 1929. The drying of solids II. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 21, n. 10, p. 12-16 / 976-980.
- Shimelis, E. A.; Rakshit, S. K. 2007. Effect of processing on antinutrients and in vitro digestibility of kidney bean (*Phaseolus vulgaris*, L.) varieties grown in East Africa. *Food Chem.*, v. 103, p. 161-172.
- Shoenlechner, R.; Jurackova, K. and Berghofer, E. 2005. Pasta production from the pseudocereals amaranth, quinoa and buckwheat. In *Using cereal science and technology for the benefit of consumers*. (Proceedings of the 12th International ICC Cereal and Bread Congress. 23-26 May 2004. Shoenlechner, R.; Jurackova, K. and Berghofer, E. 2005. Pasta production from the pseudocereals amaranth, quinoa and buckwheat. In *Using cereal science and technology for the benefit of consumers*.

- (Proceedings of the 12th International ICC Cereal and Bread Congress. 23-26 May 2004.
- Silva, L. M. R.; Abreu, D. A.; Soares, D. J.; Pontes, D. F.; Constant, P. B. L. 2010. Processamento de bolo com farinha de quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd): estudo de aceitabilidade. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.12, n.2, p.125-132.
- Slavin, J. 2004. Whole grains and human Health. Nutr Res Rev, 17:99-110.
- Soraide, D. 2011. La quinua real em el Altiplano sur de Bolivia. Comité Técnico Complejo Quinoa Altiplano Sur. Documento técnico para la denominación de origen. Fundación FAUTAPO. Bolívia.
- Spehar, C. R. 2002. Utilização da quinoa como alternativa para diversificar alimentos. In: Simpósio sobre ingredientes na alimentação animal, 2. Uberlândia. Anais... Uberlândia, MG: Colégio Brasileiro de Nutrição Animal: UFU, 2002. p. 49-58.
- Spehar, C. R.; Santos, R. L. B.; Nasser, L. C. 2003. Diferenças entre *Chenopodium quinoa* e a planta daninha *Chenopodium album*. Planta Daninha, Viçosa, v. 22, p. 126- 130.
- Sphear, C. R. 2006. Adaptação da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) para incrementar a diversidade agrícola e alimentar no Brasil. Cad. Ciênc. Tecnol., Brasília, v. 23, n.1, p. 41-62.
- Spehar, C. R.; Souza, P. I. M. 1993. Adaptação da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) ao cultivo nos cerrados do Planalto Central: resultados preliminares. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 28, n. 5, p. 635-639.
- Stikic, Radmila; Glamoclija, Djordje; Demin, Mirjana; Vucelic-Radovic, Biljana; Jovanovic, Zorica; Milojkovic-Opsenica, Dusanka; Jacobsen, Sven Erik and Milovanovic, Mirjana. 2012. Agronomical and nutritional evaluation of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) as an ingredient in bread formulations. Journal of Cereal Science. 55(2):132-138.
- Tang, Yao; Li, Xihong; Chen, Peter X.; Zhang, Bing; Hernandez, Marta; Zhang, Hua; Marcone, Massimo F.; Liu, Ronghua and Tsao, Rong. 2015a.

- Characterisation of fatty acid, carotenoid, tocopherol/tocotrienol compositions and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes. *Food Chemistry*. 174:502-508.
- Tapia, M. 1997. Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación. 2. ED. Santiago: FAO – Oficina Regional de la FAO para la América Latina y Caribe,. 273 p.
- Taverna, L. G.; Leonel, M.; Mischán, M. M. 2012. Changes in physical properties of extruded sour cassava starch and quinoa flour blend snacks. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 32, n. 4, p. 826-834.
- Tester, R.F., & Debon, S.J.J. 2000. Annealing of starch – a review. *Int. J. Biol. Macromol.*, 27, 1-12.
- Tester, R. F., & Morrison, W. R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. 1. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal Chemistry*, 67, 551-557.
- Torres, S. 1991. Curso: Conceptos Modernos de Preservación de Alimentos en el Mercado Norteamericano. UNALM-Perú.
- Travaglini, D.A.; Aguirre, J.M.; Silveira, E.T. 2001. Desidratação de frutas. In: **Desidratação de frutas e hortaliças – Manual técnico**. Campinas: ITAL. p.31-34.
- USDA. 2005. US Department of Agriculture. Department of Health and Human Services. Nutrition and Your Health: Dietary Guidelines for Americans. Washington, DC.
- Valcárcel-Yamani, Beatriz and Lannes, Suzana Caetano da Silva. 2012. Applications of quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd.) and amaranth (*Amaranthus* Spp.) and their influence in the nutritional value of cereal based foods. *Food and Public Health* 2012, 2(6): 265-275.
- Valls Porta, A. 1993. El proceso de extrusión en cereales y habas de soja i. Efecto de la extrusión sobre la utilización de nutrientes. IX CURSO DE ESPECIALIZACION FEDNA. BARCELONA, 8 y 9 de Noviembre de 1993.
- Van Arsdel, W.B. 1973. Drying phenomena. In: Van Arsdel, W.B.; Copley, M.J. Morgan Jr., A.I. Food dehydration, 2 ed., Westorp., AVI publishing Co., v.1, cap.3, p. 22-57.

- Vega-Gálvez, Antonio; Miranda, Margarita; Vergara, Judith; Uribe, Elsa; Puente, Luis and Martínez, Enrique A. 2010. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.), an ancient Andean grain: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 90(15):2541-2547.
- Vega A. 2003. Estudio de la deshidratación y rehidratación del pimiento rojo (*Capsicum Annuum* L.) var. Lamuyo. (Tesis Doctoral) Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España. [Links]
- Velioglu, Y.S.; Mazza, G.; Gao, L. and Oomah, B.D. 1998. Antioxidant activity and total phenolics in selected fruits, vegetables, and grain products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 46(10):4113-4117.
- Villacorta, L.; Talavera, V. 1976. Anatomía del grano de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) *Anales Científicos (Perú)*. 14, 39-45.
- Walstra, P. 2002. Chap.6 Polymers. In *Physical Chemistry of Foods*. Marcel Dekker. New York.
- Weerts A.H. Martin D.R. Lian G. Melrose J.R. 2006. Modelling the hydration of foodstuffs, *Simulation Modelling Practice and Theory*; 13: 119-128. [Links]
- WHO/FAO/UNU. 2007. World Health Organization/ Food and Agriculture Organization of the United Nations/United Nations University. Protein and amino acid requirements in human nutrition. (Report of a Joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation). WHO Technical Report Series, N° 935. Geneva, Switzerland.
- Zogzas, N.P.; Maroulis, Z.B.; Marinos-Kouris, D. 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14 (10), 2225-2253.

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla 1. Resultados de evaluación de solubilidad e índice de absorción de agua y evaluación sensorial para la quinua amarilla compuesta.

Ensayo	Presión (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Solubilidad (%)	IAA (g agua/g ms)	Evaluación sensorial (% de aros despendidos)
1	1	3	16.04	3.31	40
2	1.5	3	16.17	3.48	40
3	2	3	16.39	3.66	50
4	1	4	16.26	3.52	40
5	1.5	4	16.41	3.68	50
6	2	4	16.65	3.88	50
7	1	5	16.68	3.94	50
8	1.5	5	16.86	4.11	60
9	2	5	17.11	4.36	60
10	1.5	4	16.41	3.68	50
11	1.5	4	16.41	3.68	50
12	1.5	4	16.41	3.68	50

Tabla 2. Resultados de evaluación de solubilidad e índice de absorción de agua y evaluación sensorial para la quinua negra ayrampo.

Ensayo	Presión (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Solubilidad (%)	IAA(g agua/g ms)	Evaluación sensorial (% de aros despendidos)
1	1	3	17.02	4.08	60
2	1.5	3	17.1	4.12	60
3	2	3	17.17	4.34	60
4	1	4	17.22	4.28	60
5	1.5	4	17.31	4.36	60
6	2	4	17.42	4.62	60
7	1	5	17.61	4.66	60
8	1.5	5	17.73	4.79	60
9	2	5	17.96	5.12	70
10	1.5	4	17.31	4.36	60
11	1.5	4	17.31	4.36	60
12	1.5	4	17.31	4.36	60

Tabla 3. Resultados de evaluación de solubilidad e índice de absorción de agua y evaluación sensorial para la quinua negra ccollana.

Ensayo	Presión (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Solubilidad (%)	IAA(g agua/g ms)	Evaluación sensorial (% de aros despendidos)
1	1	3	16.08	4.08	60
2	1.5	3	16.12	4.12	60
3	2	3	16.34	4.34	60
4	1	4	16.28	4.28	60
5	1.5	4	16.36	4.36	60
6	2	4	16.62	4.62	60
7	1	5	16.66	4.66	60
8	1.5	5	16.79	4.79	60
9	2	5	17.12	5.12	70
10	1.5	4	16.36	4.36	60
11	1.5	4	16.36	4.36	60
12	1.5	4	16.36	4.36	60

Tabla 4. Resultados de evaluación de solubilidad e índice de absorción de agua y evaluación sensorial para la quinua roja pasankalla.

Ensayo	Presión (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Solubilidad (%)	IAA(g agua/g ms)	Evaluación sensorial (% de aros despendidos)
1	1	3	14.18	4.32	60
2	1.5	3	14.28	4.54	60
3	2	3	14.39	4.69	65
4	1	4	14.38	4.55	60
5	1.5	4	14.5	4.78	65
6	2	4	14.63	4.98	65
7	1	5	14.78	4.98	65
8	1.5	5	14.96	5.22	70
9	2	5	15.14	5.44	70
10	1.5	4	14.5	4.78	65
11	1.5	4	14.5	4.78	65
12	1.5	4	14.5	4.78	65

Tabla 5. Resultados de evaluación de solubilidad e índice de absorción de agua y evaluación sensorial para la quinua rosada de juli.

Ensayo	Presión (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Solubilidad (%)	IAA(g agua/g ms)	Evaluación sensorial (% de aros despendidos)
1	1	3	16.39	3.37	40
2	1.5	3	16.61	3.48	40
3	2	3	16.79	3.52	40
4	1	4	16.7	3.57	40
5	1.5	4	16.93	3.7	45
6	2	4	17.12	3.76	45
7	1	5	17.32	3.94	50
8	1.5	5	17.56	4.12	60
9	2	5	17.75	4.22	60
10	1.5	4	16.93	3.7	45
11	1.5	4	16.93	3.7	45
12	1.5	4	16.93	3.7	45

ANEXO 2

I. Variedad de quinua rosada de Juli

Análisis de Varianza para ISA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Presion	0.260417	1	0.260417	75000.00	0.0000
B:Tiempo	1.34427	1	1.34427	387148.81	0.0000
AA	0.00120417	1	0.00120417	346.80	0.0000
AB	0.000225	1	0.000225	64.80	0.0002
BB	0.0630375	1	0.0630375	18154.80	0.0000
Error total	0.0000208333	6	0.00000347222		
Total (corr.)	1.67067	11			

R-cuadrada = 99.9988 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.9977 por ciento
Error estándar del est. = 0.00186339
Error absoluto medio = 0.00104167
Estadístico Durbin-Watson = 2.6 (P=0.6944)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.341667

Análisis de Varianza para IAA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Presion	0.0640667	1	0.0640667	1740.68	0.0000
B:Tiempo	0.608017	1	0.608017	16519.70	0.0000
AA	0.00350417	1	0.00350417	95.21	0.0001
AB	0.004225	1	0.004225	114.79	0.0000
BB	0.0260042	1	0.0260042	706.53	0.0000
Error total	0.000220833	6	0.0000368056		
Total (corr.)	0.702567	11			

R-cuadrada = 99.9686 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.9424 por ciento
Error estándar del est. = 0.00606676
Error absoluto medio = 0.00319444
Estadístico Durbin-Watson = 1.26415 (P=0.0350)
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.335692

II. Variedad de quinua Amarilla compuesta

Análisis de Varianza para ISA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Presion	0.22815	1	0.22815	27378.00	0.0000
B:Tiempo	0.700417	1	0.700417	84050.00	0.0000
AA	0.00481667	1	0.00481667	578.00	0.0000
AB	0.0016	1	0.0016	192.00	0.0000
BB	0.0280167	1	0.0280167	3362.00	0.0000
Error total	0.00005	6	0.00000833333		
Total (corr.)	0.975867	11			

R-cuadrada = 99.9949 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.9906 por ciento
Error estándar del est. = 0.00288675
Error absoluto medio = 0.00166667
Estadístico Durbin-Watson = 3.16667 (P=0.9488)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.597222

Análisis de Varianza para IAA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Presion	0.212817	1	0.212817	2056.75	0.0000
B:Tiempo	0.640267	1	0.640267	6187.81	0.0000
AA	0.00120417	1	0.00120417	11.64	0.0143
AB	0.001225	1	0.001225	11.84	0.0138
BB	0.0360375	1	0.0360375	348.28	0.0000
Error total	0.000620833	6	0.000103472		
Total (corr.)	0.901767	11			

R-cuadrada = 99.9312 porciento
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.8738 porciento
 Error estándar del est. = 0.0101721
 Error absoluto medio = 0.00541667
 Estadístico Durbin-Watson = 2.81208 (P=0.8160)
 Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.480145

III. Variedad de quinua Negra ayrampo

Análisis de Varianza para ISA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Presion	0.0816667	1	0.0816667	224.43	0.0000
B:Tiempo	0.67335	1	0.67335	1850.43	0.0000
AA	0.000816667	1	0.000816667	2.24	0.1848
AB	0.01	1	0.01	27.48	0.0019
BB	0.03375	1	0.03375	92.75	0.0001
Error total	0.00218333	6	0.000363889		
Total (corr.)	0.810025	11			

R-cuadrada = 99.7305 porciento
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.5058 porciento
 Error estándar del est. = 0.0190759
 Error absoluto medio = 0.0104167
 Estadístico Durbin-Watson = 2.69847 (P=0.7541)
 Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.408079

Análisis de Varianza para IAA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Presion	0.187267	1	0.187267	6128.73	0.0000
B:Tiempo	0.686817	1	0.686817	22477.64	0.0000
AA	0.0228167	1	0.0228167	746.73	0.0000
AB	0.01	1	0.01	327.27	0.0000
BB	0.02535	1	0.02535	829.64	0.0000
Error total	0.000183333	6	0.0000305556		
Total (corr.)	0.956492	11			

R-cuadrada = 99.9808 porciento
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.9649 porciento
 Error estándar del est. = 0.00552771
 Error absoluto medio = 0.00305556
 Estadístico Durbin-Watson = 1.95455 (P=0.2749)
 Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.0265152

IV. Variedad de quinua Negra Ccollana

Análisis de Varianza para ISA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Presion	0.187267	1	0.187267	6128.73	0.0000
B:Tiempo	0.686817	1	0.686817	22477.64	0.0000
AA	0.0228167	1	0.0228167	746.73	0.0000
AB	0.01	1	0.01	327.27	0.0000
BB	0.02535	1	0.02535	829.64	0.0000
Error total	0.000183333	6	0.0000305556		
Total (corr.)	0.956492	11			

R-cuadrada = 99.9808 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.9649 por ciento
Error estándar del est. = 0.00552771
Error absoluto medio = 0.00305556
Estadístico Durbin-Watson = 1.95455 (P=0.2749)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.0265152

Análisis de Varianza para IAA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Presion	0.187267	1	0.187267	6128.73	0.0000
B:Tiempo	0.686817	1	0.686817	22477.64	0.0000
AA	0.0228167	1	0.0228167	746.73	0.0000
AB	0.01	1	0.01	327.27	0.0000
BB	0.02535	1	0.02535	829.64	0.0000
Error total	0.000183333	6	0.0000305556		
Total (corr.)	0.956492	11			

R-cuadrada = 99.9808 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.9649 por ciento
Error estándar del est. = 0.00552771
Error absoluto medio = 0.00305556
Estadístico Durbin-Watson = 1.95455 (P=0.2749)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.0265152

V. Variedad de quinua pasankalla

Análisis de Varianza para ISA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Presión (kgf/cm2)	0.112067	1	0.112067	1597.78	0.0000
B:Tiempo	0.686817	1	0.686817	9792.24	0.0000
AA	0.0000375	1	0.0000375	0.53	0.4922
AB	0.005625	1	0.005625	80.20	0.0001
BB	0.0376042	1	0.0376042	536.14	0.0000
Error total	0.000420833	6	0.0000701389		
Total (corr.)	0.848167	11			

R-cuadrada = 99.9504 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.909 por ciento
Error estándar del est. = 0.0083749
Error absoluto medio = 0.00430556
Estadístico Durbin-Watson = 1.23762 (P=0.0313)
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.346122

Análisis de Varianza para IAA

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Presión (kgf/cm2)	0.2646	1	0.2646	4948.36	0.0000
B:Tiempo	0.728017	1	0.728017	13614.86	0.0000
AA	0.0009375	1	0.0009375	17.53	0.0058
AB	0.002025	1	0.002025	37.87	0.0008
BB	0.0247042	1	0.0247042	462.00	0.0000
Error total	0.000320833	6	0.0000534722		
Total (corr.)	1.0202	11			

R-cuadrada = 99.9686 por ciento
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.9423 por ciento
 Error estándar del est. = 0.00731247
 Error absoluto medio = 0.00402778
 Estadístico Durbin-Watson = 2.55844 (P=0.6680)
 Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.294913

ANEXO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE SECADO

Tabla 1: Resultado de humedad y difusividad para la quinua Rosada de Juli

Tiempo(min)	Humedad (%)	Humedad (g agua/100g ms)	Difusividad (m/s ²)
0	18.523	22.73	Inf
0.5	16.25	19.40	2.29E-08
1	15.75	18.70	1.70E-08
1.5	15.54	18.40	1.32E-08
2	15.33	18.10	1.13E-08
4	14.89	17.50	7.32E-09
6	14.44	16.87	6.17E-09
8	13.92	16.16	5.89E-09
10	13.64	15.80	5.28E-09
12	13.29	15.33	5.06E-09
15	13.02	14.97	4.47E-09
20	12.74	14.60	3.71E-09
25	12.13	13.81	3.63E-09
30	11.66	13.20	3.49E-09
35	11.50	13.00	3.13E-09
45	11.19	12.60	2.66E-09
60	10.71	12.00	2.27E-09
80	9.99	11.10	2.05E-09
110	9.50	10.50	1.68E-09
150	9.50	10.50	1.23E-09
180	9.50	10.50	1.03E-09

Tabla 2: Resultado de humedad y difusividad para la quinua Amarilla Compuesta

Tiempo(min)	Humedad (%)	Humedad (g agua/100g ms)	Difusividad (m/s²)
0	18.523	22.73	Inf
0.5	16.388	19.60	2.02E-08
1	15.182	17.90	2.48E-08
1.5	14.942	17.57	1.90E-08
2	14.638	17.15	1.67E-08
4	14.024	16.31	1.12E-08
6	13.676	15.84	8.69E-09
8	13.170	15.17	7.95E-09
10	12.664	14.50	7.62E-09
12	12.434	14.20	6.86E-09
15	12.204	13.90	5.91E-09
20	11.817	13.40	5.00E-09
25	11.426	12.90	4.48E-09
30	11.032	12.40	4.17E-09
35	10.635	11.90	3.97E-09
45	10.153	11.30	3.50E-09
60	10.072	11.20	2.68E-09
80	9.747	10.80	2.18E-09
110	9.420	10.40	1.71E-09
150	9.420	10.40	1.26E-09
180	9.420	10.40	1.05E-09

Tabla 3: Resultado de humedad y difusividad para la quinua Negra Ayrampo

Tiempo(min)	Humedad (%)	Humedad (g agua/100g ms)	Difusividad (m/s²)
0	18.5328	22.75	Inf
0.5	16.0369	19.10	2.74E-08
1	15.754	18.70	1.70E-08
2	15.1405	17.84	1.27E-08
4	14.632	17.14	8.40E-09
6	14.07	16.37	7.33E-09
8	13.771	15.97	6.26E-09
10	13.004	14.95	6.76E-09
12	12.6638	14.50	6.35E-09
15	12.2037	13.90	5.91E-09
20	11.6608	13.20	5.23E-09
25	11.2689	12.70	4.69E-09
30	10.8734	12.20	4.35E-09
35	9.991	11.10	4.68E-09
45	9.5841	10.60	4.03E-09
60	9.2559	10.20	3.27E-09
80	9.2559	10.20	2.45E-09
110	9.2559	10.20	1.78E-09
150	9.2559	10.20	1.31E-09
180	9.2559	10.20	1.09E-09

Tabla 4: Resultado de humedad y difusividad para la quinua Negra Ccollana

Tiempo(min)	Humedad (%)	Humedad (g agua/100g ms)	Difusividad (m/s ²)
0	18.5328	22.75	Inf
0.5	16.036	19.10	2.74E-08
1	15.354	18.14	2.23E-08
2	15.0405	17.70	1.35E-08
4	14.6802	17.21	8.19E-09
6	14.2382	16.60	6.79E-09
8	13.6758	15.84	6.52E-09
10	13.1187	15.10	6.48E-09
12	12.6638	14.50	6.35E-09
15	12.2037	13.90	5.91E-09
20	11.6608	13.20	5.23E-09
25	11.2689	12.70	4.69E-09
30	10.8734	12.20	4.35E-09
35	9.991	11.10	4.68E-09
45	9.5841	10.60	4.03E-09
60	9.2559	10.20	3.27E-09
80	9.2559	10.20	2.45E-09
110	9.2559	10.20	1.78E-09
150	9.2559	10.20	1.31E-09
180	9.2559	10.20	1.09E-09

Tabla 5: Resultado de humedad y difusividad para la quinua pasankalla

Tiempo(min)	Humedad (%)	Humedad (g agua/100g ms)	Difusividad (m/s²)
0	18.5328	22.75	Inf
0.5	16.0369	19.10	2.74E-08
1	15.454	18.28	2.09E-08
2	15.1405	17.84	1.27E-08
4	14.442	16.88	9.24E-09
6	14.142	16.47	7.10E-09
8	13.5758	15.71	6.79E-09
10	13.041	15.00	6.67E-09
12	12.6638	14.50	6.35E-09
15	12.2037	13.90	5.91E-09
20	11.6608	13.20	5.23E-09
25	11.2689	12.70	4.69E-09
30	10.6734	11.95	4.59E-09
35	9.991	11.10	4.68E-09
45	9.5841	10.60	4.03E-09
60	9.2559	10.20	3.27E-09
80	9.2559	10.20	2.45E-09
110	9.2559	10.20	1.78E-09
150	9.2559	10.20	1.31E-09
180	9.2559	10.20	1.09E-09

ANEXO 4

IMÁGENES DE LAS VARIEDADES DE QUINUA ANTES DE LA COCCIÓN

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**



IMÁGENES DE LAS VARIEDADES DE QUINUA DESPUÉS DE LA COCCIÓN Y DESHIDRATADO EN LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS

TRATAMIENTO P1 T3:

Variedades de quinoa sometidas a tratamientos de presión de 1 kgf/cm² y tiempo de cocción de 3 minutos.

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**



TRATAMIENTO P1 T4:
Variedades de quinoa sometidas a tratamientos de presión de 1 kgf/cm² y tiempo de cocción de 4 minutos.

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**



TRATAMIENTO P1 T5:
Variedades de quinoa sometidas a tratamientos de presión de 1 kgf/cm² y tiempo de cocción de 5 minutos.

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**



TRATAMIENTO P1.5 T3:
Variedades de quinua sometidas a tratamientos de presión de 1,5 kgf/cm² y tiempo de cocción de 3 minutos.

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**



TRATAMIENTO P1.5 T4:
Variedades de quinua sometidas a tratamientos de presión de 1,5 kgf/cm² y tiempo de cocción de 4 minutos.

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**



TRATAMIENTO P1.5 T5:
Variedades de quinua sometidas a tratamientos de presión de 1,5 kgf/cm² y tiempo de cocción de 5 minutos.

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**



TRATAMIENTO P2 T3:

Variedades de quinua sometidas a tratamientos de presión de 2 kgf/cm² y tiempo de cocción de 3 minutos.

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**



TRATAMIENTO P2 T4:
Variedades de quinua sometidas a tratamientos de presión de 2 kgf/cm² y tiempo de cocción de 4 minutos.

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**



TRATAMIENTO P2 T5:

Variedades de quinua sometidas a tratamientos de presión de 2 kgf/cm² y tiempo de cocción de 5 minutos.

QUINUA ROSADA DE JULI



**QUINUA AMARILLA
COMPUESTA**



**QUINUA NEGRA
AYRAMPO**



**QUINUA NEGRA
CCOLLANA**



**QUINUA ROJA
PASANKALLA**

