

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



“ESTUDIO COMPARATIVO DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN, PROPIEDADES FÍSICAS Y MICROESTRUCTURALES DE TRES VARIEDADES DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* WILLD.), CULTIVADAS A DIFERENTES ALTITUDES”

TESIS

PRESENTADA POR:

FRANKLYN ELARD ZAPANA YUCRA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PROMOCIÓN: 2015 – II

PUNO – PERÚ

2017

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

“ESTUDIO COMPARATIVO DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN, PROPIEDADES FÍSICAS Y MICROESTRUCTURALES DE TRES VARIETADES DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.), CULTIVADAS A DIFERENTES ALTITUDES”

TESIS

**PRESENTADA POR:
FRANKLYN ELARD ZAPANA YUCRA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL
FECHA DE SUSTENTACIÓN: 02 DE FEBRERO DEL 2017**



APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE

.....

D. Sc. Rosario Edely ORTEGA BARRIGA

PRIMER MIEMBRO

.....

Dr. Ronald ASTETE TEBES

SEGUNDO MIEMBRO

.....

M. Sc. Marienela CALSIN CUTIMBO

DIRECTOR DE TESIS

.....

Ing. Saire Roenfi GUERRA LIMA

PUNO – PERÚ

2017

Área : Ingeniería y tecnología

Tema : Propiedades físicas y estructurales

DEDICATORIA

A Dios, por todas sus bondades y la sabiduría

A mis queridos padres Eusebio Zapana y Basilia Yucra, por ser el mejor ejemplo de templanza, perseverancia, esfuerzo y trabajo, porque gracias a sus esfuerzos nunca me ha hecho falta nada, por el gran amor y cuidado que tienen por mí y por mis hermanos. A mis hermanos Lelis Rosel y Magaly Amalia, por ser mi ejemplo a seguir; admiro la sencillez, el empeño y el esfuerzo, por su cariño, apoyo en todo momento y por ser mi mayor alegría y lo más lindo que tengo en mi vida.

Lucha por un mañana mejor, con más fuerza cada día, como el sol que ilumina cada día, sin presentar excusas, todo esfuerzo ya sea a corto o al largo plazo tiene ecos en el futuro, siempre con humildad y perseverancia “nunca te des por vencido, la última llave puede abrir puertas”.

Franklyn Elard Zapana Yucra
Puno, Perú 2017.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, por impartir todos los conocimientos durante mis estudios de pregrado, que es maravilloso finalizar una etapa de mi vida y muy agradecido.

A mi director de tesis Roenfi Guerra Lima por su asesoría siempre dispuesta y asesor de tesis Ing. Jose Manuel Prieto por la dedicación e interés en la realización de esta tesis.

Al Dr. Augusto Pumacahua por haberme ayudado con los análisis de datos y al Ing. Jose Luis Llacho por proporcionar las muestras de quinua y preguntar siempre por la tesis.

A mis jurados de tesis, D. Sc. Rosario E. Ortega, Dr. Ronal Astete, M. Sc. Marienela Calsin por la dedicación, coordinación, orientación, consejos y apoyo, siempre los tendré presente.

A mis compañeros tesisistas del laboratorio de Ingeniería de Alimentos, Amparo, Pamela, Haidee, Yeltsin y Gledy, que antes y durante la realización de la tesis me hicieron pasar buenos momentos, y también a Milagros Lerma, por su apoyo incondicional. Siempre los llevaré en mi corazón.

Al Sr. Rufino encargado del laboratorio de Ingeniería de Alimentos por poner a mi disposición todos los medios necesarios para la realización de la presente tesis.

A Dr. Wilson Castro y Mg. Tony Chuquizuta de la Universidad de Toribio Rodríguez de Mendoza, por el apoyo incondicional y la motivación en el mundo de la investigación científica.

A la Universidad Pontificia Universidad Católica del Perú, al laboratorio de CITE de materiales.

A Vicerrectorado de Investigación (VRI) de la Universidad Nacional del Altiplano Puno – Perú por el financiamiento mediante el proyecto de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación a nivel individual/Multidisciplinario con Res. Rec. N° 3261-2015-R-UNA.

A todos mis amigos y amigas por su cariño y apoyo en todo momento. A todos ustedes, mi mayor reconocimiento y gratitud.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. Quinoa.....	13
2.1.1. Origen de los granos de quinua	13
2.1.2. Clasificación taxonómica de la quinua	15
2.1.3. Nombres comunes de la quinua.....	15
2.1.4. Descripción botánica	16
2.1.5. Morfología del granulo del almidón.....	18
2.1.6. Distribución geográfica de la quinua.....	19
2.1.7. Variedades de quinua.....	20
2.1.8. Composición química y valor nutricional	22
2.1.9. Usos de la quinua.....	23
2.2. Agua en los alimentos.....	24
2.3. Actividad de agua	25
2.4. Isotermas de sorción	26
2.4.1. Clasificación de las isotermas de sorción	27
2.4.2. Métodos de medición de isotermas de sorción.....	29
2.5. Modelos matemáticos de isotermas de sorción.....	29
2.5.1. Modelos GAB.....	30
2.5.2. Modelos de Henderson	31
2.5.3. Modelos Halsey	31
2.5.4. Modelo Oswin	32
2.5.5. Modelos Peleg	32
2.5.6. Modelo Smith	33
III. MATERIALES Y MÉTODOS	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	41
4.1. Isotermas de adsorción de tres variedades de quinua	41
4.1.1. Ajuste a los modelos matemáticos de las isotermas de adsorción.....	43
4.2. Propiedades físicas.....	46
4.3. Microestructura	52
CONCLUSIONES.....	55
RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXO	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Granos de quinua de tres variedades: (a) Salcedo INIA, (b) Pasankalla y (c) Negra Collana.....	13
Figura 2: Grano de quinua sección longitudinal mediana del grano. Pericarpio (PE), perispermo (P), endocarpio (EN), cotiledón (C), radícula (R) (Prego et al., 1998).	17
Figura 3: Zonas agroecológicas de cultivos de quinua en Perú (Apaza et al., 2013.).....	19
Figura 4: Quinua variedad Salcedo INIA (Apaza et al. 2013).	20
Figura 5: Quinua variedad Negra Collana (Apaza et al. 2013).	21
Figura 6: Quinua variedad Pasankalla (Apaza et al. 2013).	21
Figura 7: Productos de quinua, cereales andinos.....	24
Figura 8: Isoterma de sorción para un producto alimenticio (Fellows, 2000; Shafiur Rahman, 2009).	27
Figura 9: Isotermas de adsorción de Vander Waals, (a) tipo I, (b) tipo II (c) tipo III, (d) tipo IV, (e) tipo V. (Mathlouthi & Rogé, 2003).	28
Figura 10: Metodología del proceso de imágenes (Medina et al., 2010).	40
Figura 11: Curvas de retención de agua de tres variedades cultivadas a en Puno (3818 m.s.n.m.) y Arequipa (2500 m.s.n.m.).....	43
Figura 12: Isotermas de sorción con el modelo matemático G.A.B.....	45
Figura 13: Microfotografías de granos de quinua en posición de reposo, (a) Salcedo INIA, (c) Negra Collana (e) Pasankalla cultivadas a 2500 m.s.n.m.; (b) Salcedo INIA (d) Negra Collana (f) Pasankalla cultivadas a 3018 m.s.n.m.	46
Figura 14: Microestructura de la variedad Salcedo INIA.....	52
Figura 15: Microestructura de la variedad Negra Collana	53
Figura 16: Microestructura de la variedad Pasankalla.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tamaño de almidón de diferentes productos naturales	18
Tabla 2: Comparación de la composición química proximal de las semillas de quinua con algunos cereales.	22
Tabla 3: Comparación de la composición de aminoácidos esenciales de las semillas de quinua con algunos cereales.	23
Tabla 4: Comparación de la composición de minerales de semillas de quinua con algunos cereales	23
Tabla 5: Parámetros estimados del modelo GAB para diversos productos alimenticios. ...	30
Tabla 6: Parámetros estimados del modelo Henderson para diversos productos alimenticios.....	31
Tabla 7: Parámetros estimados del modelo Oswin para diversos productos alimenticios. .	32
Tabla 8: Parámetros estimados del modelo Peleg para diversos productos alimenticios....	33
Tabla 9: Parámetros estimados del modelo Peleg para diversos productos alimenticios....	33
Tabla 10: Concentración de sal y agua de sales de diferentes actividades de agua	35
Tabla 11: Modelos matemáticos aplicados en las isothermas de adsorción de granos de quinua de tres variedades cultivada en dos altitudes.	36
Tabla 12: Humedad de equilibrio de granos de quinua, variedad Salcedo INIA (SI), Pasankalla (PK) y Negra Collana (NC) a temperatura constante de 20°C.	41
Tabla 13: Ajuste de datos experimentales, obtenidos para las isothermas de sorción de granos de quinua de tres variedades (Salcedo INIA, Negra Collana y Pasankalla).	44
Tabla 14: Propiedades geométricas de tres variedades de quinua cultivadas en dos altitudes geográficas.....	47
Tabla 15: Densidad de las tres variedades de quinua cultivadas en dos altitudes.	49
Tabla 16: Color de tres variedades de quinua cultivadas a dos altitudes.	50

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

X_m	: Humedad de monocapa.
R^2	: Coeficiente de correlación de Pearson.
a_w	: Actividad de agua.
X_{eq}	: Humedad de equilibrio.
KJ	: Kilo Joule.
g	: Gramo.
ms	: Masa seca
n	: Constante de Henderson.
R	: Constante universal de los gases.
mm	: Milímetro.
mμ	: Micrómetros.
%E	: Porcentaje de error.
q_{st}	: Calor esotérico neto de adsorción.
°C	: Grados Celsius.
T	: Temperatura.
P₀	: Presión de vapor de agua.
P	: Presión parcial de vapor de agua de la muestra.
m	: Contenido de humedad de la monocapa (% en base seca).
C	: Constante cinética relacionada a la sorción en la primera capa.
K	: Constante cinética relacionada a la sorción de las capas subsecuentes a la primera capa.
S.I. – P.	: Salcedo INIA Puno.
S.I. – A.	: Salcedo INIA Arequipa.
PK. – P.	: Pasankalla Puno.
PK. – A.	: Pasankalla Arequipa.
N.C. – P.	: Negra Collana Puno.
N.C. – A.	: Negra Collana Arequipa.
m.s.n.m.	: Metros sobre el nivel del mar
CHE.	: Contenido de humedad en equilibrio

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se desarrolló la identificación de granos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) mediante propiedades físicas y microestructurales cultivadas a 2500 y 3818 m sobre el nivel del mar. El objetivo es caracterizar tres variedades de quinua (Salcedo INIA, Pasankalla y Negra Collana), en función a tres actividades de agua (a_w) (0.112, 0.657 y 0.979), las isotermas de sorción se ajustaron en seis modelos matemáticos G.A.B., Oswin, Henderson, Peleg, Halsey y Smith, la calidad de ajuste se evaluó con el coeficiente de regresión (R^2) y el porcentaje de error (%E); las propiedades físicas (forma, tamaño y color) mediante análisis de imágenes; densidad y porosidad mediante picnómetro y la microestructura del granos mediante microscopio electrónico de barrido (SEM). Las variedades de quinua cultivadas a 2500 m.s.n.m. presentan mayor adsorción de agua (52%) que las variedades cultivadas a 3818 m.s.n.m. (47.09%), con valores de agua en la monocapa que oscila entre 0,0430, a 0,0470 g H₂O/g m.s y 0,0380 a 0,0450 g H₂O/g m.s, el modelo Peleg ajustó mejor los datos experimentales con valores de $R^2= 0,999$ y %E = 0,194). Las semillas de quinua presentaron formas de prolato esferoide, con tamaños que varían entre 1,30 a 1,83 mm, con valores de las coordenadas colorimétricas que varían en la L* (luminosidad) 77,3304 a 86,0306, a* (verde a rojo) 0,1643 a 0,1643 y b* (azul a amarillo) 5,3382 a 4,3383; las densidades de 0,966 a 1,097 kg/m³ y porosidad de 0,189 a 0,366; los empaquetamientos de almidón observados por SEM, presentaron formas esféricas con diámetros de 25 μ m a 2500 m.s.n.m. y ovaladas con diámetro de 30 μ m a 3018 m.s.n.m. Los resultados muestran que se puede establecer criterios de diferenciación física de variedades adaptadas a diferentes pisos altitudinales como una herramienta de diferenciación y origen geográfico de procedencia, con la finalidad de establecer condiciones de almacenamiento, control de calidad, trazabilidad y denominación de origen.

Palabras clave: Quinua, propiedades físicas, isoterma adsorción y microestructurales.

ABSTRACT

In the present work of investigation the identification of quinoa grains (*Chenopodium quinoa* Willd.) Was developed by physical and microstructural properties cultivated at 2500 and 3818 m above sea level. The objective is to characterize three varieties of quinoa (Salcedo INIA, Pasankalla and Negra Collana), based on three water activities (a_w) (0.112, 0.657 and 0.979), the sorption isotherms were adjusted in six mathematical models GAB, Oswin, Henderson, Peleg, Halsey and Smith, the quality of fit was evaluated with the regression coefficient (R^2) and the error percentage (% E); the physical properties (shape, size and color) through image analysis; density and porosity by means of a pycnometer and the microstructure of the grains by scanning electron microscopy (SEM). The varieties of quinoa grown at 2500 m.s. they have higher water adsorption (52%) than the varieties grown at 3818 m.s. (47.09%), with water values in the monolayer ranging from 0.0430, to 0.0470 g H₂O / g ms and 0.0380 to 0.0450 g H₂O / g ms, the Peleg model adjusted the experimental data better with values of $R^2 = 0.999$ and % E = 0.194). The quinoa seeds presented forms of spheroidal prolate, with sizes ranging from 1.30 to 1.83 mm, with values of the colorimetric coordinates that vary in L* (luminosity) 77.3304 to 86.0306, a* (green to red) 0.1664 to 0.1663 and b* (blue to yellow) 5.3382 to 4.3383; the densities from 0.966 to 1.097 kg / m³ and porosity from 0.189 to 0.366; the starch packings observed by SEM, had spherical shapes with diameters of 25 μ m to 2500 m.s. and ovals with a diameter of 30 μ m at 3018 m.s. The results show that criteria of physical differentiation of varieties adapted to different altitudinal levels can be established as a tool of differentiation and geographical origin, with the purpose of establishing storage conditions, quality control, traceability and denomination of origin.

Keywords: Quinoa, physical properties, adsorption and microstructural isotherms.

I. INTRODUCCIÓN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es una planta originada en la Meseta Andina, alrededor del Lago Titicaca, a 3800 m sobre el nivel del mar en la frontera Peruana-Boliviana (Jacobsen, 2003). A nivel mundial, existe más de 6000 variedades de quinua cultivadas por los agricultores (Rojas et al., 2015). Teniendo en cuenta la alta diversidad genética de la quinua, (Chevassus-au-louis & Bazile, 2008), estas variedades se pueden adaptar a diferentes zonas geográficas como en climas, calientes, secos, fríos, templado y lluviosos con temperaturas y humedades variables (Geşiński, 2008), donde se identificaron a variedades que se adaptan a diferentes condiciones geografías como en: Salares, Montañas, Valles Interandinos, Yungas y Tierras Bajas Costeras (Anabalón & Thomet, 2009; Bazile et al., 2013; Fuentes & Bhargava, 2011). Los granos de quinua presentan diversos colores como blanco, amarillo, rojo y negro (Bhargava et al., 2007; Ruiz et al., 2014; Vega-Gálvez et al., 2010), dependiendo de la variedad y la genética.

En el año 2016 Perú fue uno de los principales productores y exportadores de quinua a nivel mundial, exportando a 62 países, destacando ventas a Estados Unidos, con 35% del total de exportación, con una baja de 30% frente al 2015 (Agrodata, 2016), afectando a los productores de la región de Puno (3818 msnm), por la adulteración de los productos orgánicos, con quinua convencionales cultivadas en las zonas de la costa, que presentan mayores rendimientos y hasta dos veces de cultivo anual.

La mayor producción de cultivo de la quinua en Perú, está ubicada entre 2500 - 3900 msnm., con clima: templado a frío, heladas frecuentes, con dependencia de las precipitaciones pluviales, mientras en las regiones de la costa (<1000 nsnm) las condiciones agroecológicas favorecen a la mayor producción de quinua, hasta dos cosechas anuales. En consecuencia los granos de quinua presentan variaciones en las propiedades físicas, químicas y rendimiento por hectárea cultivadas a diferentes medios geográficos (Bazile et al., 2013).

Sin embargo, los países importadores de granos de quinua se encuentran a diferentes condiciones medioambientales y estos varían en comparación a la región altiplánica, donde los granos no son correctamente almacenados, estos pueden absorber agua con niveles no permitidos por los estándares de calidad, causando deterioro microbiano y otras reacciones adversas. El conocimiento sobre la ganancia o pérdida de agua en los alimentos es de vital importancia en varias etapas de la cadena de consumo, la actividad de agua (a_w) de un alimento es una característica que depende de la temperatura a mayores temperaturas tiene

mayor capacidad de adsorción de agua, por encima de ciertos límites químicos y enzimáticos. Las reacciones microbiológicas que son capaces del deterioro del alimento, debido al exceso de agua adsorbida del medio ambiente, que causa efectos negativos en la producción, transporte, comercio y consumo.

Las isotermas de sorción pueden constituirse experimentalmente y se puede ajustar a modelos matemáticos para predecir las humedades de almacenamiento de los granos de quinua (Emanuel et al., 2014; Rosa et al., 2015; Villa Vélez et al., 2015).

El análisis de las características físicas como: isotermas de adsorción de agua, forma, tamaño, densidad, porosidad, color y microestructura, son parámetros importantes para el análisis de la calidad de los granos, sumando a la aplicación de normativas existentes en los mercados, formarían un aspecto importante para comprender los cambios físicos que presentan los granos de quinua cultivadas a diferentes altitudes geográficas, así mismo es importante para el manejo de postcosecha, proceso industrial, almacenamiento, sistemas de transporte y diseños de equipos. Las propiedades físicas son herramientas de diferenciación de la procedencia de los granos mediante análisis físicos, para establecer condiciones de almacenamiento, control de calidad, trazabilidad y denominación de origen. Para lo cual se planteó los siguientes objetivos:

- ✚ Determinar las isotermas de sorción de humedad de tres variedades de quinua cultivadas en dos pisos altitudinales y ajustar a seis modelos matemáticos para evaluar su capacidad de retención de agua.
- ✚ Determinar las propiedades físicas (tamaño, forma, color, densidad y porosidad) los granos de quinua de tres variedades de quinua, cultivadas en diferentes pisos altitudinales a diferentes actividades de agua.
- ✚ Determinar e identificar la estructura de almidones de los granos de quinua de tres variedades a diferentes actividades de agua, mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Quinua

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), es un grano alimenticio originario de los andes Peruanos y de la región Andina de América del Sur, territorio importante como centro de domesticación de plantas alimenticias, debido a la existencia de microclimas y diferencias altitudinales que dan origen a una diversidad de zonas agroecológicas (Repo-Carrasco et al., 2003). Es una planta que alcanza un tamaño de 0,5 a 3,0 m de altura, dependiendo del genotipo y de las condiciones ambientales, y posee un tallo recto o ramificado de color variable (Soto et al., 2015). La semilla contiene el mayor porcentaje del valor nutricional, estas presentan tamaños de varían entre 1.8 - 2.2 mm (Figura 1), de colores variados como: blanco, café, amarillo, rosado, gris, rojo y negro (Apaza et al., 2013). Debido a su alto valor nutricional, adaptabilidad a diferentes condiciones agroecológicas (plasticidad genética), tolerancia a suelos salinos, resistencia a temperaturas extremas y a la poca disponibilidad de agua, la quinua es un cultivo importante en la lucha contra el hambre a nivel mundial y el cambio climático (Ruiz et al., 2014). Su contenido proteico varía desde un 12% hasta un 20% en dependiendo de las variedades, con una composición balanceada de aminoácidos, vitaminas y minerales esenciales (calcio, magnesio, zinc y hierro), así como polifenoles y fibra dietética (Soto et al., 2015).

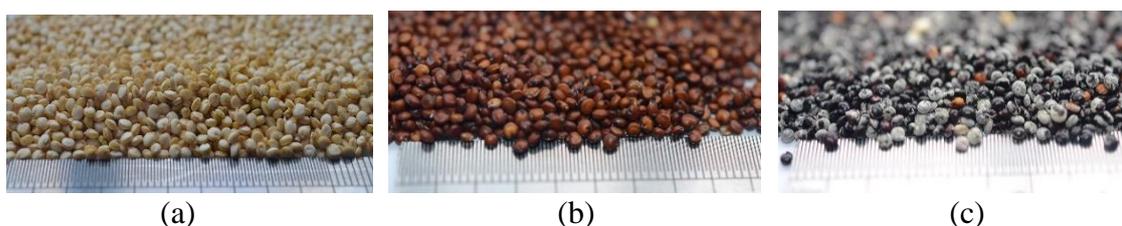


Figura 1: Granos de quinua de tres variedades: (a) Salcedo INIA, (b) Pasankalla y (c) Negra Collana

2.1.1. Origen de los granos de quinua

La quinua es un grano alimenticio domesticado, protegido y conservado por los pueblos indígenas andinos de la Región Andina de América del Sur (Repo-Carrasco et al., 2010), su principal centro de origen y de conservación es el Altiplano alrededor del lago Titicaca del Perú y Bolivia sobre los 3800 msnm (Tapia et al., 2014). Si bien en la antigüedad la quinua se cultivó ampliamente desde Colombia hasta el sur de Chile.

Las evidencias encontradas en departamento de Ayacucho, en el Perú, indicarían que la domesticación de la quinua ocurrió 5000 años antes de Cristo, comprobándose durante este proceso la variación de semillas de color oscuro a blanco (Tapia et al., 2014); asimismo, existen hallazgos arqueológicos encontrados en sepulturas indígenas en diferentes regiones del Perú y Chile con abundante cantidad de semillas e inflorescencias y en la cerámica de la cultura Tiahuanaco (Perú), en la que se representa a la planta de quinua con varias panojas distribuidas a lo largo del tallo, lo que mostraría a una de las razas más primitivas (Mujica, 1993; citado por Estrada et al., 2014). A la llegada de los españoles, la quinua tenía un desarrollo tecnológico apropiado y una amplia distribución tanto en el territorio inca como fuera de él. El primer cronista español que reporta el cultivo de quinua fue Pedro de Valdivia quien al observar los cultivos alrededor de Concepción, menciona: “los indios para su alimentación siembran también la quinua entre otras plantas”, posteriormente Inca Garcilaso de la Vega, en sus Comentarios Reales dice: “el segundo lugar de los meses que se crían sobre la haz de la tierra dan a lo que llaman “quinua” y en español “mijo” o arroz pequeño: porque en el grano y el color se le asemeja algo” (Mujica, 1993; citado por Estrada et al., 2014).

El historiador Inca Garcilaso de la Vega, también hace referencia a la primera exportación de granos de quinua al viejo mundo. Sin embargo, la mayor distribución geográfica de esta especie en el continente sucedió a partir del último tercio del siglo XX. La quinua tiene una gran adaptabilidad a diferentes condiciones de cultivo, sus múltiples usos y por sus valores nutricionales bien equilibrados (Abderrahim et al., 2015; Li, Wang, & Zhu, 2016). La especie tiene numerosos genotipos, que son bien adaptado a las condiciones ambientales extremas con respecto a la altitud, salinidad del suelo, cantidad de precipitación anual y temperaturas mínimas (Tapia, 1999). La semilla es resistente a la sequía y las heladas. Se cultiva frecuentemente en suelos pobres y son capaces de desarrollarse (Vilche et al., 2003). Hoy en día la quinua se encuentra en supermercados, restaurantes y en la industria (principalmente de alimentos) en diversidad de productos y para todo tipo de consumidores. Esta difusión y desarrollo se repite en países como Inglaterra, Alemania, Dinamarca, España, Italia, Francia, Rusia, Portugal, Himalaya, sureste de Asia y recientemente África (Apaza et al., 2013).

Los Incas apreciaron el alto valor nutricional de la quinua, y la facilidad en la molienda, la quinua junto a otros cultivos permitieron que las poblaciones rurales sacaran ventajas de su valor nutritivo y del saldo excepcional entre el aceite, las proteínas y las grasas

(Bhargava et al., 2006; Repo-Carrasco et al., 2003). Hoy en día, Perú, Bolivia, Chile, Ecuador, Colombia y Argentina han ampliado la producción de este grano andino, el cual se centra en los grandes avances tecnológicos y comerciales y es de interés no solo por la nutrición humana sino también por los de subproductos que ofrecen buenas alternativas alimenticias para los animales así como las aplicaciones en la industria farmacéutica (Brady, et al., 2007; Gely & Santalla, 2007; Repo-Carrasco et al., 2003).

2.1.2. Clasificación taxonómica de la quinua

La quinua fue descrita por primera vez por el científico alemán Luis Christian Willdenow (Apaza et al., 2013) y su clasificación taxonómica es la siguiente:

Reino: Vegetal
 División: Fanerógamas
 Clase: Dicotyledóneas
 Subclase: Angiospermas
 Orden: Centrospermales
 Familia: Chenopodiaceae
 Género: *Chenopodium*
 Sección: Chenopodia
 Subsección: Cellulata
 Especie: *Chenopodium quinoa* Willd.

2.1.3. Nombres comunes de la quinua

La quinua recibe diferentes nombres en el área andina que varía entre localidades y de un país a otro, así como también recibe nombres fuera del área andina que varía con los diferentes idiomas (Mujica, 1996).

- ✚ **En Perú:** Quinua, Jiura, Quiuna
- ✚ **En Colombia:** Quinua, Suba, Supha, Uba, Luba, Ubalá, Juba, Uca.
- ✚ **En Ecuador:** Quinua, Juba, Subacguque, Ubaque, Ubate.
- ✚ **En Bolivia:** Quinua, Jupha, Jiura.
- ✚ **En Chile:** Quinua, Quingua, Dahuie.
- ✚ **En Argentina:** Quinua, quiuna.
- ✚ **En España:** Quinua, Quinoa, Quingua, Triguillo, Trigo inca, Arrocillo, Arroz del Perú, Kinoa.
- ✚ **En Inglés:** Quinoa, Quinua, Kinoa, Swet quinoa, Peruvian rice, Inca rice, Petty rice.
- ✚ **En Francés:** Anserine quinoa, Riz de peruo, Petit riz de Peruo, Quinoa.
- ✚ **En Italiano:** Quinua, Chinua.
- ✚ **En Portugués:** Arroz miudo do Perú, Espinafre do Perú, quinoa.

2.1.4. Descripción botánica

La planta de quinua presenta una altura que varía entre 0.60 a 3.00 m, dependiendo de la variedad, los genotipos, la fertilidad de los suelos y las condiciones ambientales donde crece. La quinua presenta una raíz pivotante, vigorosa, profunda que puede alcanzar hasta 1,80 cm de profundidad, bastante ramificada y fibrosa, lo cual le confiere tolerancia a la sequía y buena estabilidad. Su tallo es cilíndrico en el cuello de la planta y angulosos a partir de las ramificaciones, de coloración variable desde el verde al rojo, muchas veces presenta estrías y también axilas pigmentadas de color, verde rojo o púrpura. Con hojas alternas formadas por peciolo y lámina, los peciolos son largos, finos y acanalados en su parte superior y de longitud variable dentro de la misma planta. La lámina en la misma planta puede tener forma romboidal, triangular o lanceolada, plana u ondulada, algo gruesa, carnosa y tierna, cubierta por cristales de oxalato de calcio, de colores rojo, púrpura o cristalino, tanto en el haz como en el envés (Azcón & Talón, 2003).

La coloración de la hoja es muy variable va del verde al rojo con diferentes tonalidades debido a la presencia de oxalatos de calcio. (Tapia et al., 1979). La inflorescencia en panoja típica, constituida por un eje central y ramificaciones secundarias, terciarias y pedicelos que sostienen a los glomérulos, el eje principal está más desarrollado que los secundarios, ésta puede ser laxa (Amarantiforme) o compacta (glomerulada), existiendo formas intermedias entre ambas. La longitud de la panoja es variable, dependiendo de los genotipos, tipo de quinua, lugar donde se desarrolla y condiciones de fertilidad de los suelos, alcanzando de 30 a 80 cm de longitud por 5 a 30 cm de diámetro, el número de glomérulos por panoja varía de 80 a 120 y el número de semillas por panoja de 100 a 3000, encontrando panojas grandes que rinden hasta 500 gramos de semilla por inflorescencia. Las flores son pequeñas alcanzan un tamaño máximo de 3 mm, incompletas, sésiles y desprovistas de pétalos, pueden ser hermafroditas, pistiladas (femeninas) y androestériles, tienen 10% de polinización cruzada. Fruto en aquenio, con forma cilíndricolenticular, levemente ensanchado hacia el centro. Constituido por el perigonio que envuelve a la semilla por completo (Apaza et al., 2013).

La semilla es de forma lenticular, elipsoidal, cónica o esferoidal y presenta diferentes colores (Azcón & Talón, 2003), Varios investigadores investigaron las propiedades físicas de las diferentes semillas, como la linaza (Krishna et al., 2013); semillas de chía (Salvia hispanica) (Ixtaina et al., 2008); garbanzo (Altuntas & Karadag, 2006); quinua (Medina et al., 2010; Vilche et al., 2003) respectivamente. Los granos de quinua presentan tres partes bien definidas (Figura 2) que son: Epispermo, embrión y perisperma.

- a) **Epispermo:** en ella se ubica la saponina que le da el sabor amargo al grano y cuya adherencia a la semilla varía en cada genotipo (Prego et al., 1998).
- b) **Embrión:** está formado por dos cotiledones y la radícula, constituye el 30% del volumen total de la semilla, el cual envuelve al perisperma como un anillo, con una curvatura de 320° , es de color amarillo, mide 3,54 mm de longitud y 0,36 mm de ancho (Prego et al., 1998).
- c) **Perisperma:** es el principal tejido de almacenamiento y está constituido principalmente por granos de almidón, es de color blanquecino y representa prácticamente el 60% de la superficie de la semilla, Las estructuras de los almidones presentan formas oblongos de granos simples con tamaños aproximadamente de 20-25 μm en el endospermo (Prego et al., 1998).

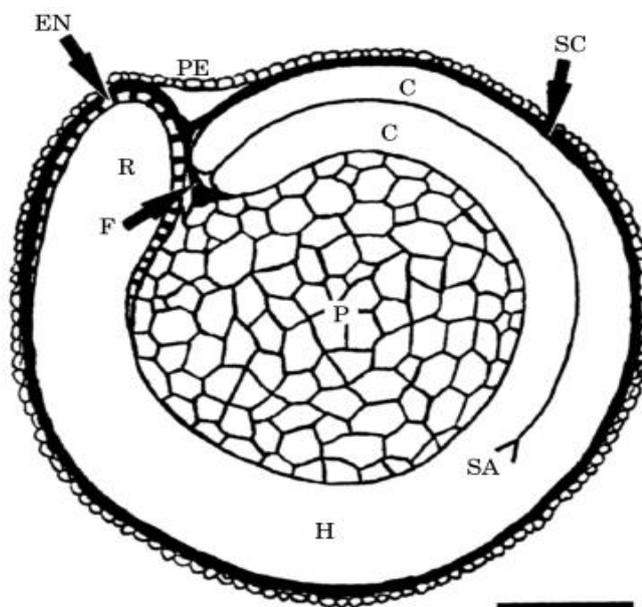


Figura 2: Grano de quinua sección longitudinal mediana del grano. Pericarpo (PE), perispermo (P), endocarpo (EN), cotiledón (C), radícula (R) (Prego et al., 1998).

La quinua es una planta herbácea anual, dicotiledónea de amplia dispersión geográfica, su periodo vegetativo varía desde 90 hasta 240 días, se adapta a suelos ácidos de pH 4,5, hasta alcalinos con pH de 9,0. Asimismo prospera en suelos arenosos hasta los arcillosos, la coloración de la planta es también variable con los genotipos y etapas fenológicas, 28 desde el verde hasta el rojo, pasando por el púrpura oscuro, amarillo, anaranjado granate y demás gamas que se puedan diferenciar (INIA, 2006).

2.1.5. Morfología del granulo del almidón

El almidón aparece al microscopio compuesto de diminutas estructuras individuales llamados gránulos cuyo tamaño y forma son característicos de cada especie. Espin et al., (1999), menciona que los gránulos de almidón proveniente de diversas especies botánicas difieren en su morfología. Las formas de almidón de tubérculos y raíces presentan formas ovalados, redondeados, esféricos, y poligonales. Los gránulos de almidón del frijol y arveja tienen forma característica de discos densos con un corte alrededor del centro o al final y un desgaste en el borde del granulo. Los gránulos de almidón provenientes de frutas y nueces varían en forma. Algunos almidones de nueces tienen una inusual morfología de media esfera, aunque la mayoría presenta formas redondeadas. Los gránulos de almidón de tamaño pequeño y muy pequeño (Tabla 1), son caracterizados por formas muy irregulares y poligonales (Rojas, 2010).

Tabla 1: Tamaño de almidón de diferentes productos naturales

Almidones	Tamaño mínimo (μm)	Tamaño máximo (μm)	Desviación estándar (μm)	Tamaño promedio (μm)
Maíz	1.72	29.15	5.62	12.69
Yuca	1.47	23.92	4.74	10.38
Papa	2.02	65.94	10.61	15.22

Fuente: Camilo (2008).

Pumacahua et al., (2016), determinó que los gránulos de almidón mediante microscopia electrónica de barrido en el endospermo se encuentran agrupados para formar estructuras de proteínas fuertemente unido, obteniendo forma poliédrica con diámetro de 1 μm .

2.1.6. Distribución geográfica de la quinua

La quinua en América del Sur se extiende desde los 5° Latitud N., hasta los 43° de Latitud S. (Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Argentina y Chile) y su distribución altitudinal varía de nivel del mar hasta los 4000 m sobre el nivel del mar (FAO, 2011).

Las variedades de quinua pueden adaptarse en valles interandinos (2300 a 3500 m.s.n.m.), con precipitación anual entre 700 y 1500 mm; tierras altas (también llamado Altiplano de los Andes) (3500 a 3900 m.s.n.m.) con precipitación anual de 400-800 mm; Salares (4000 m.s.n.m.) con precipitaciones dependiente de la lluvia (150-300 mm) y con muchos días de heladas; nivel del mar (Costa) se adapta a las regiones que se encuentran entre el nivel del mar y 1000 m.s.n.m., donde la precipitación anual oscila entre 500 y 1500 mm; Yungas crece bajo condiciones de humedad tropical y en áreas con altos niveles de precipitaciones, la mayor cantidad de diversidad de quinua se encuentra en las zonas del altiplano de Perú y Bolivia (Martínez et al., 2009).

La producción de quinua en Perú se concentra principalmente en el altiplano y los valles interandinos, con tendencia creciente del cultivo en la costa por sus características agroclimáticas favorables para la producción, la versatilidad de adaptarse a diferentes altitudes y generación de nuevas variedades adaptables al contexto actual de cambio climático, estos aspectos favorables hacen que el cultivo de quinua tenga una alta capacidad de expandirse a casi todos los sistemas agrícolas (Figura 3) desde el nivel del mar hasta el altiplano (Apaza et al., 2013).

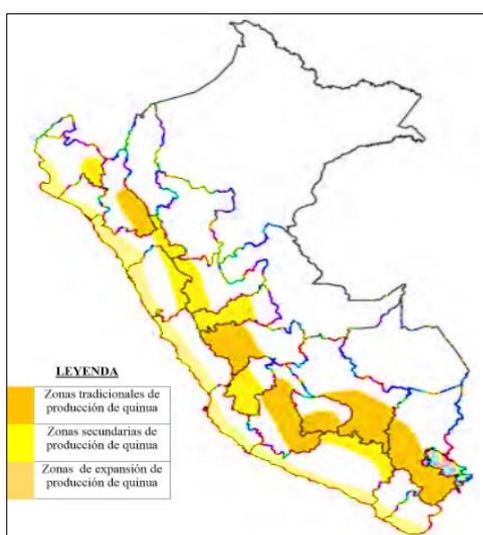


Figura 3: Zonas agroecológicas de cultivos de quinua en Perú (Apaza et al., 2013.)

2.1.7. Variedades de quinua

La quinua es una planta endémica de América del Sur, que fue domesticada por las personas que viven en los Andes, en particular en Perú y Bolivia miles de años atrás y se le llama de diferentes nombres de acuerdo a la zona de producción, y cultivan aproximadamente 250 especies de esta familia a nivel mundial, por su alto valor nutricional e increíble balance de aminoácidos esenciales (Repo-Carrasco et al., 2003). En la investigación se estudió tres variedades de quinua (Negra Collana, Pasankalla y Salcedo INIA), ya que estas variedades se adaptan a diferentes pisos altitudinales y son las más comercializadas a nivel mundial (Estrada et al., 2014).

2.1.7.1. Variedad Salcedo INIA

La quinua que se adapta en el altiplano en las zonas agroecológicas circunslacustre y Suni del altiplano entre los 3800 a 3950 msnm, con clima semi seco frío, precipitación pluvial de 400 a 560 mm, con temperaturas de 6° a 17°C, en suelos de textura franco y franco arenoso con pH de 5,5 a 7,8. Valles interandinos y costa de 640 a 1314 msnm, temperatura máxima de 24° a 25°C en suelos de textura arenosa (Figura 4) (INIA, 1995).



Figura 4: Quinua variedad Salcedo INIA (Apaza et al. 2013).

2.1.7.2. Variedad Negra Collana – INIA 420

La quinua que se adapta en zonas agroecológicas Suni del altiplano entre los 3800 a 3900 msnm, con el clima frío seco, precipitación pluvial de 400 a 550 mm, con temperaturas de 4° a 15°C, en suelos de textura franco y franco arenoso con pH de 5,5 a 8,0. También se adapta a valles interandinos y a la costa peruana (Figura 5) (INIA, 2008).



Figura 5: Quinoa variedad Negra Collana (Apaza et al. 2013).

2.1.7.3. Variedad Pasankalla – INIA 415

La quinoa que se adapta en zonas agroecológicas de suni del altiplano entre los 3800 a 3900 msnm, con clima frío seco, precipitación pluvial de 400 a 550 mm, con temperaturas de 4° a 15°C, en suelos de textura franco y franco arenoso con pH de 5,5 a 8,0. También se adapta a valles interandinos entre los 2750 a 3750 msnm y en la costa entre los 640 y 1314 msnm, temperatura máxima de 24 a 25°C en suelos de textura franco arenosos (Figura 6) (INIA, 2006).



Figura 6: Quinoa variedad Pasankalla (Apaza et al. 2013).

Los granos de quinoa de todas las variedades nativas con cultivadas a diferentes suelos de acuerdo a los ecotipos; forman genéticamente distintos grupos con diferencias evidentes en cuanto a la procedencia geográfica, el suelo, las condiciones climáticas, las prácticas culturales y tradicionales con diferente niveles de adaptación a la altitud, la sequía, la salinidad y la duración del día o exposición al sol (Bazile et al., 2013).

2.1.8. Composición química y valor nutricional

Es la dieta de antiguos habitantes del Imperio Inca que ha generado interés por ser extremadamente nutritiva. Al igual que los cereales, los granos de quinua contienen carbohidratos, proteínas, grasas, minerales, fibra y vitaminas (Tabla 1). Se observaron amplias variaciones en el conjunto de nutrientes de la quinua por 100 g de porción comestible. La USDA (2014) evaluó 555 accesiones de quinua encontrando valores de proteína (10,21 - 18,39%), grasa (2,05 - 10,88%), fibra dietética (3,46 - 9,68%), cenizas (2,12 - 5,12%), carbohidratos (52,31 - 72,98%) y energía ($1,31 \times 10^4$ - $1,68 \times 10^4$ kJ kg⁻¹). Las diferencias de los nutrientes dependen de las variedades de quinua, altitud geográfica, condición agronómica y procedimientos usados para la purificación de las semillas de quinua, la remoción de la cubierta (saponina). En la Tabla 2 se presentan los aminoácidos esenciales de la quinua, donde se observaron variaciones de aminoácidos por consecuencia de las condiciones agronómicas. Fischer et al., (2013) evaluó que las restricciones hídricas afectan una disminución significativa de histina y treonina, también puede ser afectado por las variedades, condiciones ambientales y tipos de suelo y zonas geográficas. En la Tabla 3 se muestra la composición de minerales en semillas de quinua divulgados por diversos autores, las variaciones de los minerales dependen mucho del proceso de purificación de las semillas (lavado de quinua) y también influye la región donde se cultiva los granos. Razzaghi et., (2014) determinó que en regiones frías el contenido de Mg y Na fueron altos que en la región árida; el contenido de P, Ca, Fe, Cu, y Zn fue mayor en regiones áridas, estos resultados afirman la acción de un mecanismo selectivo para el control de la distribución de minerales en semillas de quinua en base a condiciones medioambientales y de los suelos.

Tabla 2: Comparación de la composición química proximal de las semillas de quinua con algunos cereales.

proximales (g/100 g)	Quinua	Trigo	Arroz	Maíz	Cebada	Avena
Humedad	13,28	10,94	11,62	10,37	10,09	8,22
Proteínas	14,12	13,68	7,13	9,42	9,91	16,89
Grasa	6,07	4,47	0,66	4,74	1,16	6,90
Carbohidratos	64,16	71,13	79,95	74,26	77,72	66,27
Cenizas	2,38	1,78	0,64	1,20	1,11	1,72

USDA/ARS (2014).

Tabla 3: Comparación de la composición de aminoácidos esenciales de las semillas de quinua con algunos cereales.

Aminoácidos (mg/g de proteína)	Quinua	Trigo	Arroz	Maíz	Cebada	Avena
Fenilalanina	42,00	49,80	53,40	49,20	56,10	53,00
Histidina	28,80	23,50	23,60	30,50	22,50	24,00
Isoleucina	35,70	39,00	43,20	35,80	36,50	41,10
Leucina	59,50	68,30	82,60	122,60	67,90	76,00
Lisina	54,20	22,10	36,20	28,10	37,20	41,50
Metionina	21,90	16,20	23,60	20,90	19,20	18,50
Treonina	29,80	26,80	35,80	37,60	34,00	34,00
Triptofano	11,80	12,90	11,60	7,10	16,60	13,90
Valina	42,10	43,40	61,00	50,60	49,00	55,50

USDA/ARS (2014).

Tabla 4: Comparación de la composición de minerales de semillas de quinua con algunos cereales

Minerales (mg/100g)	Quinua	Trigo	Arroz	Maíz	Cebada	Avena
Calcio, Ca	47,00	34,00	28,00	7,00	29,00	54,00
cobre, Cu	0,59	0,55	0,22	0,31	0,42	0,63
Hierro, Fe	4,57	3,52	0,80	2,71	2,50	4,72
Potasio, K	563,00	431,00	115,00	287,00	280,00	429,00
Magnesio, Mg	197,00	144,00	25,00	127,00	79,00	177,00
Manganeso, Mn	2,03	3,01	1,09	0,49	1,32	4,92
Selenio, Se (µm/100g)	8,50	89,40	15,10	15,50	37,70	
Sodio, Na	5,00	2,00	5,00	35,00	9,00	2,00
Fosforo, P	457,00	508,00	115,00	210,00	221,00	523,00
Zinc, Zn	3,10	4,16	1,09	2,21	2,13	3,97

USDA/ARS (2014).

2.1.9. Usos de la quinua

La quinua es un cultivo andino de alto valor nutritivo, con una calidad proteica sobresaliente y una capacidad de ser transformado en una gran gama de productos (Jacobsen et al., 2003). Los pobladores alto andinos tradicionalmente utilizan el grano de quinua para elaborar meriendas, refrescos, jugos, sopas, mazamorra, peske y de manera especial, buñuelos y postres, dependiente de la disponibilidad del grano de acuerdo a la época del cultivo (INIA, 2006).

En 1996 la quinua fue catalogada por la FAO como uno de los cultivos promisorios de la humanidad, no sólo por sus grandes propiedades benéficas y por sus múltiples usos, sino también por considerarla como una alternativa para solucionar los graves problemas de nutrición humana. La NASA también la incluyó dentro del sistema CELLS (en español: Sistema Ecológico de Apoyo de Vida Controlado) para equipar sus cohetes en los viajes espaciales de larga duración, por ser un alimento de composición nutritiva excelente como alternativa para solucionar los problemas de insuficiente ingesta de proteínas. Existen varios productos derivados de la quinua, como insuflados, harinas, fideos, hojuelas, granolas, barras energéticas, sopas instantáneas etc. (Figura 7); sin embargo, el uso de nuevas tecnologías permite actualmente obtener otros productos más elaborados, como el aceite de quinua, el almidón, la saponina, colorantes de las hojas y semillas, 33 concentrados proteicos, etc. Estos productos son considerados el potencial económico de la quinua por darle uso a características no sólo nutritivas sino fisicoquímicas que abarcan más allá de la industria alimentaria y ofrecen productos a la industria química, cosmética y farmacéutica (Jacobsen et al., 2003).



Figura 7: Productos de quinua, cereales andinos.

2.2. Agua en los alimentos

Según Clemente (2003) el agua es el componente que domina los sistemas alimentarios, influyendo significativamente en las variables del proceso, las características del producto y los factores de estabilidad. Todos los alimentos contienen agua y es bien conocido que aquellos más susceptibles de degradación (tanto física como química) son los que contienen altos niveles de agua. El agua controla la mayoría de los fenómenos físicos, químicos y microbiológicos que ocurren en los alimentos ya que constituye el medio de reacción y es el componente principal en la mayoría de ellos.

No obstante, también se ha observado que diferentes tipos de alimentos con el mismo contenido de agua difieren significativamente en su estabilidad o vida útil. En consecuencia, el contenido de agua por sí solo, no es un indicador real de la estabilidad.

Esta situación se atribuye, en parte, a diferencias en la intensidad con que el agua se asocia con los constituyentes no acuosos; el agua implicada en asociaciones fuertes es menos susceptible o propensa para las actividades degradativas, tales como el crecimiento de microorganismos y las reacciones químicas de hidrólisis, que el agua débilmente asociada. El término "actividad de agua" (a_w) se implantó para tener en cuenta la intensidad con que el agua se asocia a los diferentes compuestos no acuosos (Fennema, 2000).

2.3. Actividad de agua

La actividad del agua (a_w) es un parámetros que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que exista reacciones bioquímicas y desarrollo microbiano (Fennema, 2000). Por lo tanto es un parámetro importante para predecir la vida útil de un alimento, sin embargo el nivel óptimo de a_w es diferente en cada producto (Schuchmann & Schuchmann, 2005). En consecuencia, un nivel de actividad de agua ($>0,6$) puede aumentar riesgos de deterioro microbiano, mientras el secado sea excesivo reduce la calidad del producto a través de la oxidación lipídica, pardeamiento enzimático y no enzimático (Argyropoulos & Müller, 2014).

Shafiur Rahman, (2009), definen la actividad de agua como la relación entre la presión de vapor del agua en un sistema a la presión de vapor de agua pura a la misma temperatura, o la humedad relativo en equilibrio (ERH) del aire que rodea el sistema a la misma temperatura. Por lo tanto, la actividad del agua puede expresarse de la siguiente manera:

$$a_w = \frac{(P_w^v)_{sy}}{P_w^v} = HRE \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde

a_w = Actividad del agua.

$P_{w_{sy}}^v$ = Presión parcial de vapor de agua en el sistema (alimento).

P_w^v = Presión de saturación del agua líquida pura a la misma temperatura.

HRE = Humedad relativa de equilibrio.

En el equilibrio, la actividad de agua del alimento se iguala a la humedad relativa del ambiente en el cual se encuentra. En estas condiciones, el alimento no gana ni pierde agua (Marques, 2012).

Para materiales no higroscópicos la presión de vapor de la superficie es igual a la presión de vapor para el agua pura en la misma temperatura. Para un material higroscópico la presión de vapor de la superficie es más baja que la presión de vapor del agua pura, este hecho se debe mayormente a la estructura y la porosidad del material o alimento (Heldman et al., 2006).

2.4. Isotermas de sorción

Las isotermas de sorción de humedad representan la relación entre el contenido de humedad en equilibrio y la actividad del agua (a_w) a temperaturas y presiones constantes (Kaymak-Ertekin & Gedik, 2004). Como los materiales alimenticios tienen composiciones y estructuras complejas, las isotermas de sorción realmente describen las propiedades higroscópicas integradas de los diversos constituyentes o el mecanismo de sorción y la interacción de los biopolímeros de los alimentos con el agua (Kaymak-Ertekin & Gedik, 2004). El conocimiento de las isotermas es muy importante en la Agroindustria o Industria Alimentaria para el diseño de equipos, empaques, predicción de calidad, estabilidad vida útil y para calcular los cambios de humedad (Bala, 2017; Boente et al., 1996). Se han desarrollado varios procesos de preservación para prolongar la vida útil de los alimentos reduciendo la disponibilidad de agua para microorganismos e inhibiendo algunas reacciones químicas (Al-Muhtaseb et al., 2004).

Las isotermas de sorción se pueden generar a partir de proceso de adsorción o desorción; la diferencia entre estas curvas se define como histéresis, como se muestra en la Figura 7. La adsorción de agua de productos alimenticios es un proceso en el que las moléculas de agua se mezclan de forma progresiva y reversible con sólidos alimentarios mediante quimisorción, adsorción física y condensación multicapa. Una isoterma se puede dividir típicamente en tres regiones; el agua en la región A representa agua fuertemente unida, y la entalpía de vaporización es considerablemente más alta que la del agua pura. El agua ligada incluye agua estructural y agua de la monocapa, que es adsorbida por los grupos hidrófilos y polares de los componentes alimenticios (polisacáridos, proteínas, etc.) (Shafiur Rahman, 2009).

En la región B, las moléculas de agua se unen con menos firmeza que en la primera zona, por lo general se presentan en pequeños capilares. La entalpía de vaporización es ligeramente más alta que la del agua pura. Esta clase de agua constituyente puede considerarse como la transición continua del agua ligada al agua libre. Las propiedades del agua en la región C son similares a las del agua libre que se mantiene en los vacíos, grandes capilares, grietas; y el agua en esta región se une de manera suelta a los materiales alimenticios (Fellows, 2000; Shafiur Rahman, 2009).

Además, la histéresis está relacionada con la naturaleza y el estado de los componentes de los alimentos, lo que refleja su potencial de reorganizaciones estructurales y conformacionales, lo que altera el acceso a los sitios polares energéticamente favorables. La presencia de capilares en los alimentos produce una disminución considerable de la actividad del agua. La explicación de la aparición de la histéresis de sorción de la humedad comprende la teoría de la botella de tinta, la teoría de la contracción molecular, la condensación capilar y la teoría de la fatiga de hinchamiento (Raji & Ojediran, 2011).

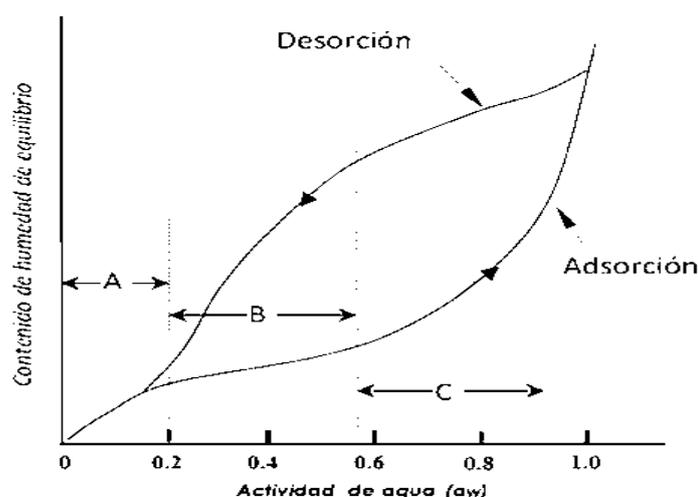


Figura 8: Isoterma de sorción para un producto alimenticio (Fellows, 2000; Shafiur Rahman, 2009).

2.4.1. Clasificación de las isotermas de sorción

Brunauer et al.,(1940); Tóth (2002) clasifican las isotermas de sorción según su forma y proceso, estableciendo cinco tipos diferentes; como se muestra en la Figura 8, Tipo 1: presentan un aumento característico de la actividad del agua en relación con el aumento del contenido de humedad; la primera derivada de esta gráfica aumenta con el contenido de humedad y las curvas son convexas hacia arriba. Este tipo de isoterma de sorción es típicamente aplicable en el proceso de llenar la capa monomolecular de agua en la superficie

interna de un material. Tipo 2: isotermas de sorción sigmoidales, en las que las curvas son cóncavas hacia arriba; toma en cuenta la existencia de multicapas en la superficie interna de un material. Tipo 3: conocida como la isoterma de Flory-Huggins, representa un disolvente o plastificante como el glicerol por encima de la temperatura de transición vítrea. Tipo 4: describe la adsorción de un sólido hidrófilo hinchable hasta que se alcanza una hidratación máxima del sitio. Tipo 5: la isoterma de adsorción multicapa Brunauer-Emmett-Teller (BET), es la que se observa en la adsorción de vapor de agua sobre carbón y está relacionada con las isotermas tipo 2 y 3. Las dos isotermas encontradas con más frecuencia en los productos alimenticios son los tipos 2 y 4 (Blahovec & Yanniotis, 2009; Mathlouthi & Rogé, 2003).

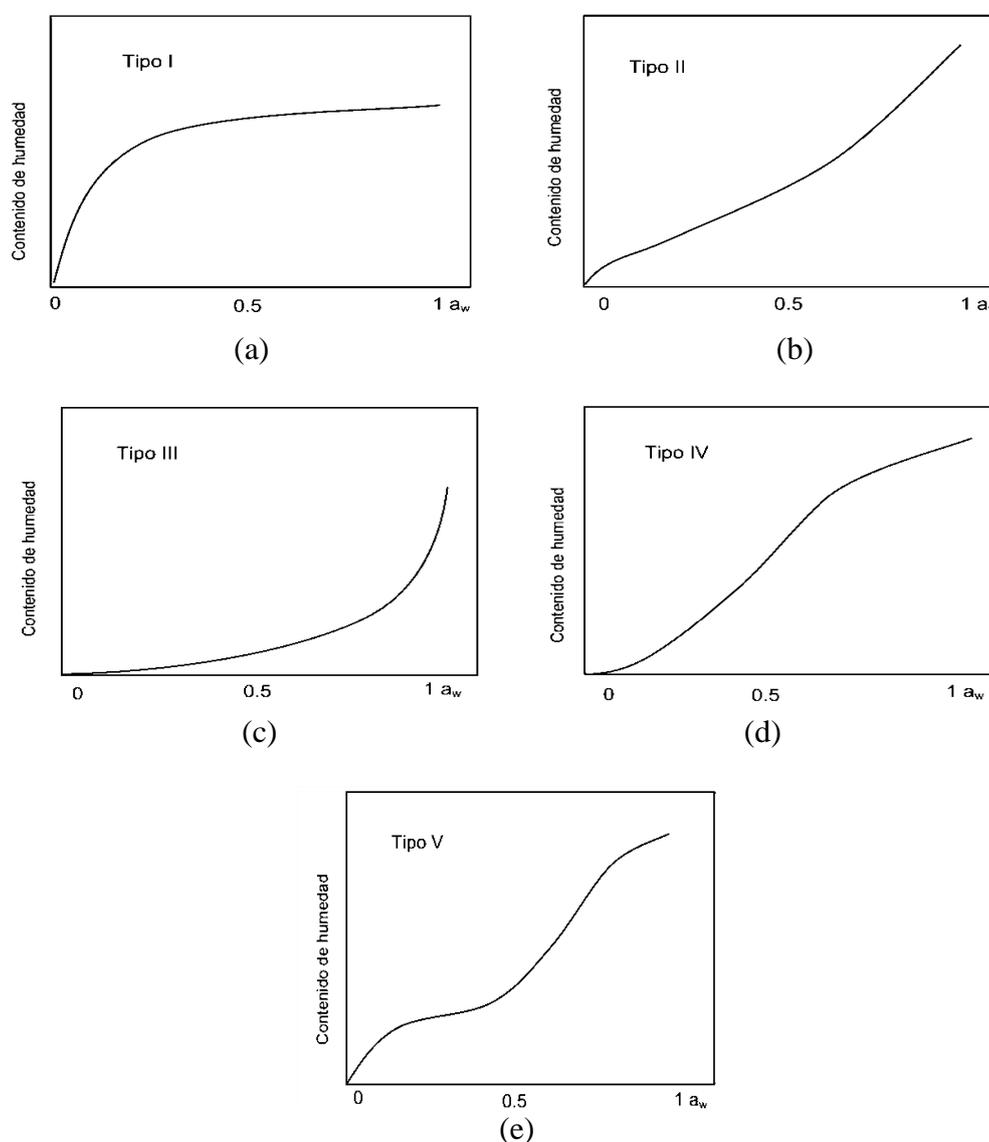


Figura 9: Isotermas de adsorción de Vander Waals, (a) tipo I, (b) tipo II (c) tipo III, (d) tipo IV, (e) tipo V. (Mathlouthi & Rogé, 2003).

2.4.2. Métodos de medición de isotermas de sorción

Para los productos alimenticios, la isoterma de sorción puede ser medido por medio de tres técnicas de medición diferentes: gravimétrico, manométrico o higrométrico, según Iglesias & Chirife, (1976). En los métodos gravimétricos, el peso de la muestra se mide con una balanza analítica. En los métodos manométricos, la presión de vapor del agua se mide cuando está en equilibrio con una muestra a un contenido de humedad dado.

En los métodos higrométricos, se mide la humedad relativa de equilibrio con una muestra a un contenido de humedad dado. Dos ejemplos de técnicas más modernas para medir la concentración en una muestra son la técnica de espectroscopia de impedancia y la técnica de reflexión y/o atenuación de la luz, como la espectroscopia infrarroja (Van der Zanden & Goossens, 2004).

2.5. Modelos matemáticos de isotermas de sorción

Con la finalidad de expresar matemáticamente la relación entre la actividad del agua y su contenido de humedad de los alimentos, se ha desarrollado diversos modelos matemáticos como modelos de regresiones lineales, no lineales, constituidos en sus parámetros por dos, tres, cuatro y seis coeficientes de regresiones parciales, que explican cada uno de los tres las zonas que conforma la isoterma de la absorción de la humedad (Yan, Sousa-Gallagher, & Oliveira, 2008; Badui Dergal, 2006).

Badui Dergal, (2006) menciona que sea propuesto más de 75 modelos matemáticos para representar las isotermas de sorción. En muchos casos, los modelos son adecuados para ciertos productos alimenticios, es más, el modelo solo exhibe una capacidad predictiva adecuada para ciertos rangos de actividad de humedad. Varios modelos matemáticos han sido propuestos para describir las isotermas de sorción. Algunos de ellos se desarrollaron con una base teórica para describir mecanismos de adsorción (Brunauer et al., 1940); mientras que los otros son simplemente empíricos o una simplificación de modelos. En algunos rangos de actividad de agua, las isotermas de sorción se pueden aproximar a ecuaciones lineales (Yan, Sousa-Gallagher, & Oliveira, 2008).

2.5.1. Modelos GAB

Van den Berg (1985) modificó la ecuación BET asumiendo que el calor de adsorción en el segundo a novena capas es menor que el calor de licuefacción. La ecuación de Anderson fue luego derivada cinética y estadísticamente por Guggenheim (1966); el modelo describe el comportamiento de sorción en una amplia gama de a_w (0 - 0,9). Por lo tanto, fue encontrado ser adecuado para analizar diversos productos alimenticios, como se muestra en la Tabla 5. El modelo de GAB se expresa en la ecuación:

$$m = \frac{m_0 C k a_w}{[(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)]} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde m_0 es el contenido de agua en la monocapa, C y k son constantes de adsorción, que están relacionadas con las energías de interacción entre la primera y las moléculas adsorbidas adicionales en los sitios de sorción individual. Se pueden expresar teóricamente como se expresa en la ecuación 3 y la ecuación 4.

$$C = c_0 \exp\left(\frac{H_0 - H_n}{RT}\right) \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$K = k_0 \exp\left(\frac{H_n - H_l}{RT}\right) \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde C_0 y k_0 son factores de alojamiento entrópico; H_0 , H_n y H_l son las sorción molar entalpías de la monocapa, las multicapas en la parte superior de la monocapa y el líquido a granel, respectivamente. R es la constante de gas ideal y T es la temperatura absoluta.

Tabla 5: Parámetros estimados del modelo GAB para diversos productos alimenticios.

Producto	Temperatura (°C)	X_m	k	c	Error (%)	Referencia
Amaranto	25	0,102	0,81	16,8	4,7	(Calzetta et al., 1999)
Maíz	24	10,1	0,69	24,3	4,5	(Aguerre et al., 1996)
Quinua	20	8,67	0,70	15,30	0,43	(Tolaba et al., 2004)
Arroz	25	11,0	0,58	19,2	2,04	(Timmermann et al., 2001)
Sorgo	37,8	8,2	0,72	23,4	1,9	(Aguerre et al., 1996)

2.5.2. Modelos de Henderson

El modelo de Henderson, (1952) es un modelo empírico y es uno de los más empleados, que describe el comportamiento de alimentos tales como granos, cereales y frutas (Tabla 6) en amplio rango de actividad agua (0,10 a 0,75). La ecuación es expresada como:

$$m = \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{C} \right]^{1/n} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Dónde C y n son constantes de cada alimento.

Tabla 6: Parámetros estimados del modelo Henderson para diversos productos alimenticios.

Producto	T. (°C)	a_w	C	n	Referencia
Maíz	25	0,10-0,85	$1,59 \times 10^{-6}$	2,68	(Henderson, 1952)
Sorgo	21	0,10-0,85	$3,40 \times 10^{-6}$	1,52	(Henderson, 1952)
Semillas de tomate	30	0,10-0,85	$4,064 \times 10^{-4}$	2,291	(Sogi et al., 2003)
Soya	25	0,10-0,85	$3,20 \times 10^{-5}$	1,52	(Henderson, 1952)
Trigo	32	0,10-0,85	$5,59 \times 10^{-7}$	3,03	(Henderson, 1952)

2.5.3. Modelos Halsey

Halsey, (1948), desarrolló un método en base al de B.E.T., es muy versátil y se ajusta muy bien entre 0,1 a 0,8 de a_w . Esta ecuación describe el comportamiento de los productos alimenticios que contienen almidón. Este modelo se presenta de la siguiente manera.

$$m = \left[-\frac{A}{\ln a_w} \right]^{1/B} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde:

m = Contenido de humedad (g/100 g m.s.)

a_w = Actividad de agua

A y B = Parámetros característicos del producto.

2.5.4. Modelo Oswin

Es un modelo empírico que presenta una ecuación de curvas en forma sigmoidea y fue desarrollado por Oswin, (1946). La ecuación es la siguiente:

$$m = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde A y B son constantes. Boquet et al., (1978) afirmaron que la ecuación de Oswin es aplicable a alimentos ricos en proteínas y almidones (Tabla 7).

Tabla 7: Parámetros estimados del modelo Oswin para diversos productos alimenticios.

Producto	T. (°C)	a_w	A	B	Error (%)	Referencia
Papa	40	0,054-0,88	0,43	8,2	4,13	(Wang & Brennan, 1991)
Menta	5	0,10-0,80	0,4127	11,553	2,34	(Iglesias & Chirife, 1976)
Harina de soya	25	0,10-0,80	0,6406	3,149	3,36	(Iglesias & Chirife, 1976)
Concentrado de proteína	21	0,08-0,80	0,4437	11,544	3,16	(Iglesias & Chirife, 1976)
Ruibarbo	10	0,10-0,80	0,7160	9,108	1,90	(Iglesias & Chirife, 1976)

* T = Temperatura

2.5.5. Modelos Peleg

Peleg (1993) desarrolló una ecuación semiempírica de cuatro parámetros para describir la isoterma de sorción sigmoidea, asumiendo el modo en que el agua es adsorbida por el sólido. Por lo tanto, se asumió que la forma sigmoidea de la línea surge de la suma de dos parábolas (con ejes horizontales y verticales, respectivamente). Por lo tanto, propuso la siguiente ecuación:

$$m = Aa_w^B + Ca_w^D \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde A, B, C y D son constantes y $B < 1$ y $D > 1$. Se demostró por Peleg (1993) y Lewicki (1998) que la ecuación 8 da un mejor ajuste que el modelo GAB. El análisis de Peleg (Lewicki, 1998) mostró que la ecuación de GAB rindió 26.3% mientras que la ecuación de Peleg dio 50.3%. Los parámetros de la ecuación de Peleg se recogen en la Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros estimados del modelo Peleg para diversos productos alimenticios.

Producto	T. (°C)	a_w	A	B	C	D	Error (%)
Arroz (Lewicki, 1998)	Ambiental	0,11-0,98	16,10	0,7497	133,52	20,04	<10
Soya (Lewicki, 1998)	Ambiental	0,11-0,98	14,51	0,6954	54,83	13,57	<10
Almidón de papa (Shafiur Rahman, 2009)	Ambiental	0,11-0,98	20,9	0,70	16,3	5,5	0,05
Almidón de papa (Lewicki, 1998)	Ambiental	0,11-0,90	20,79	0,6937	16,32	5,51	<10
Harina de trigo (Shafiur Rahman, 2009)	Ambiental	0,11-0,98	20,14	1,0562	133,62	20,29	<10

*T=Temperatura.

2.5.6. Modelo Smith

Smith (1947) desarrolló un modelo matemático empírico para describir la curva de isoterma de sorción de agua de biopolímeros de alto peso molecular. Esta isoterma da como resultado una curva sigmoidea.

$$m = A + B \ln(1 - a_w) \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde A es la cantidad de agua en la primera fracción adsorbida y B es la cantidad de agua en la fracción de humedad multicapa. En la Tabla 9, se presenta los parámetros de la ecuación de Smith para diversos alimentos.

Tabla 9: Parámetros estimados del modelo Peleg para diversos productos alimenticios.

Producto	Temperatura (°C)	a_w	A	B	Referencia
Soya	20	0,30-0,95	-0,03	13,811	(Lang & Steinberg, 1981)
Almidón	20	0,33-0,95	9,890	6,450	(Lang & Steinberg, 1981)
Almidón	30	0,33-0,95	9,127	6,297	(Lang & Steinberg, 1981)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material biológico

Los granos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) de tres variedades: Salcedo INIA (SI), Pasankalla (PK) y Negra Collana (NA), se adquirieron del Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA) – Puno (3818 m.s.n.m.) y Arequipa (2500 m.s.n.m.) (cosecha 2016), las muestras de quinua fueron debidamente certificadas de acuerdo a sus características genotípicas (Anexo 4).

3.2. Materiales

- ✚ Espátula de acero inoxidable.
- ✚ Envases de vidrio herméticos.
- ✚ Vasos presipitados Pirex de 5 ml, 50 ml y 500 ml Marca Boeco Germany.
- ✚ Probeta graduada Marca Boeco Germany de 100 ml.
- ✚ Placas Petri Pirex Marca Esteriplan.
- ✚ Hojas milimetradas.
- ✚ Portaobjetos.
- ✚ Cinta de doble cara.
- ✚ Picnómetro, Brand.
- ✚ Bisturí acero inoxidable.
- ✚ Pinzas.

3.3. Equipos

- ✚ Sistema de toma de imágenes con cámara digital Nikon modelo D7000 4F – SD 40mm. Con objetivo micro Nikkor 40mm marca Nikon.
- ✚ Microscopio electrónico de barrido (SEM), QUANTA 650 (EVO/S10).
- ✚ Balanza analítica digital, marca Sartorius, peso mínimo de 0,01mg hasta 300 g. ISO 9001.
- ✚ Estufa modelo DHG-9023A, Marca: ICSA
- ✚ Refrigerador domestico marca LEHEL -10 a 15 °C.
- ✚ Envasado al vacío marca Food Saver V2860-I.
- ✚ Una computadora marca Dell, CORE i5.

3.4. Software

- ✚ STATGRAPHIC Centurion XVI.
- ✚ Software de la cámara Nikon “Camera Control Pro 2”.
- ✚ Programa ImageJ.

3.5. Reactivos

- ✚ Cloruro de litio $\text{LiCl}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ($a_w = 0.112$), marca SOLUtest, FV. 2018.
- ✚ Nitrato de sodio NaNO_3 ($a_w = 0.657$), marca SOLUtest, FV. 2018.
- ✚ Sulfato de potasio $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ($a_w = 0.979$), marca SOLUtest, FV. 2018.
- ✚ Antimoho (Tymol), marca SOLUtest, FV. 2018.

3.6. Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción se determinaron usando el método gravimétrico estático (Lomauro, Bakshi, & Labuza, 1985). Las tres soluciones saturadas de sal (cloruro de litio, cloruro de sodio y sulfato de potasio) (Tabla 10), se utilizaron para producir humedades relativas que van del 0.11 a 0.98 (Young, 2007). Se colocaron muestras de aproximadamente 5 g de granos de quinua en pequeños vasos de vidrio y luego se almacenaron dentro de frascos sellados, teniendo su respectiva solución para cada humedad relativa diferente (Anexo 5). Los frascos se colocaron al medio ambiente con una temperatura promedio de 20°C, hasta alcanzar el equilibrio (entre 30 y 40 días). Después de los primeros 15 días, las muestras se pesaron cada 4 días para verificar si se había alcanzado el equilibrio analítico. Con el fin de prevenir el deterioro microbiano de las muestras, se colocó el timol cristalino en los recipientes donde se produjeron las actividades de agua alta ($a_w > 0.7$) (Wolf, Spiess, & Jung, 1985).

Tabla 10: Concentración de sal y agua de sales de diferentes actividades de agua

Sales	a_w	Sal/gr	Agua/ml
Cloruro de litio	0,112	15	8,5
Cloruro de sodio	0,657	20	6
Sulfato de potasio	0,979	20	9

Labuza, (1971).

3.6.1. Determinación de la humedad en equilibrio

La humedad de equilibrio (X_{eq}) fue calculada por la diferencia entre la masa de la muestra que presentó equilibrio y la masa seca, de acuerdo a la ecuación utilizada por Soleimani et al., (2006).

$$X_{eq} = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad \text{Ecuación 10.}$$

Dónde:

X_{eq} = Humedad de equilibrio en base seca (b.s.)

m_{eq} = Masa de la muestra en el equilibrio (g)

m_s = Masa seca de la muestra (g)

3.6.2. Análisis de los datos de las isotermas de sorción

3.6.2.1. Modelos isotermos

Los datos experimentales para las isotermas de adsorción obtenidas se ajustaron en seis modelos de isotermas de sorción de humedad presentados en la Tabla 11 utilizando el módulo de regresión no lineal del software Excel 2016.

Tabla 11: Modelos matemáticos aplicados en las isotermas de adsorción de granos de quinua de tres variedades cultivada en dos altitudes.

Modelos	Ecuaciones
GAB (Van den Berg, 1985)	$m = \frac{m_0 C k a_w}{[(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)]} \quad (11)$
Henderson (Henderson, 1952)	$m = \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{C} \right]^{1/n} \quad (12)$
Halsey (Halsey, 1948)	$m = \left[-\frac{A}{\ln a_w} \right]^{1/B} \quad (13)$
Oswin (Oswin, 1946)	$m = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B \quad (14)$
Peleg (Peleg, 1993)	$m = A a_w^B + C a_w^D \quad (15)$
Smith (Smith, 1947)	$m = A + B \ln(1 - a_w) \quad (16)$

Los criterios para determinar el modelo que mejor ajustó los valores experimentales fueron el porcentaje del error (%E) (Ecuación 17) y el coeficiente de correlación (R^2). Un modelo de sorción se considera aceptable cuando presenta un %E menor al 10 % y R^2 cercano a 1, generalmente indican un ajuste adecuado para fines prácticos (Lomauro et al., 1985).

$$E (\%) = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{Me - Mp}{Me} \right| \quad \text{Ecuación 17.}$$

Donde “Me” y “Mp” corresponden al contenido de humedad experimental y predicha respectivamente, y “N” es el número de valores experimentales.

3.6.2.2. Calor isostérico de sorción (Q_{st})

El calor isostérico de sorción (Q_{st}) se determinó usando la ecuación de Clausius-Clapeyron (Ecuación 18) (Iglesias & Chirife, 1976; Tsami, 1991), mediante la pendiente de

la gráfica $\ln(a_w)$ vs $1/T$ con T =Temperatura, a un CHE constante.

$$\left[\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right]_m = -\frac{Q_{st}}{R} = -\frac{q_{st} + \lambda}{R} \quad \text{Ecuación 18.}$$

Donde q_{st} es el calor isostérico neto de sorción (kJ mol^{-1}), R es la constante universal de los gases y λ es el calor latente de vaporización del agua pura, que se calculó para una temperatura fija de 20°C .

3.7. Propiedades físicas

3.7.1. Forma

Para determinar la forma se tomó microfotografías de los granos de quinua enteros de las tres variedades cultivadas en dos altitudes con un aumento de 60x, las micrografías fueron tomadas en posición de reposo y posteriormente se describió la forma con el programa ImajeJ.

3.7.2. Tamaño

Para determinar los tamaños de las semillas de quinua, se seleccionaron aleatoriamente una muestra de semillas y se midieron sus tres dimensiones (diámetro mayor, menor y espesor), se midieron con un calibrador Vernier (0,01 mm de precisión) y una balanza electrónica digital.

El diámetro medio geométrico (D_g), la esfericidad (ϕ), el volumen, el fruto y las densidades aparentes de las semillas de quinua fueron determinados por Mohsenin (1970); Altuntas & Ozcan (2006).

3.7.2.1. Diámetro medio geométrico (D_g): Se tomó 30 granos de quinua aleatoriamente y se calcularon utilizando la Ecuación 19 planteado por Mohsenin, (1970).

$$D_g = (LAH)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 19.}$$

Dónde: L es el diámetro mayor, A es el diámetro menor y H es el espesor mm.

3.7.2.2. Esfericidad (\emptyset): Se tomó 30 granos de quinua aleatoriamente y se calcularon utilizando la Ecuación 20, planteado por Mohsenin, (1970).

$$\emptyset = (LAH)^{\frac{1}{3}}/l \quad \text{Ecuación 20.}$$

3.7.2.3. Área superficial (S): A partir de las mediciones anteriores de diámetro geométrico y esfericidad en mm^2 de semilla de quinua, se encontró por analogía con una esfera aplanada del mismo diámetro geométrico, para ello se empleó la Ecuación 21 propuesto por Olajide & Ade-Omowaye, (1999).

$$s = \pi D_p^2 \quad \text{Ecuación 21.}$$

3.7.2.4. Densidad aparente (ρ_a): Se determinó midiendo la masa del grano contenido en el volumen definido de una probeta estándar de 250 ml. Las pruebas se realizaron por triplicado y se empleó la Ecuación 22 para determinar la densidad (Singh & Goswami, 1996).

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad \text{Ecuación 22.}$$

3.7.2.5. Densidad real (ρ_r): Se determinó por el método del picnómetro (Ozarslan, 2002; Singh & Goswami, 1996). Consiste en los siguientes pasos:

1. Pesar el picnómetro vacío (p_p);
2. Añadir 10 gramos de granos de quinuas al picnómetro ($p_p + \text{producto}$);
3. Cubrir el producto con alcohol y eliminar posibles burbujas de aire alojadas entre los granos con una jeringa, completar el llenado con alcohol y enrazar. Anotar la masa ($p_p + \text{producto} + \text{OH}$);
4. Llenar el picnómetro con alcohol y enrazar. Pesar y anotar su masa ($p_p + \text{OH}$).

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

$$m = p_{p+\text{OH}} - (p_{p+\text{producto}+\text{OH}} - (p_{p+\text{producto}} - p_p)) \quad \text{Ecuación 23.}$$

$$V_{\text{real}} = \frac{((p_p + OH) - p_p)}{\rho_{OH}} \quad \text{Ecuación 24.}$$

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}_{\text{real}}} \quad \text{Ecuación 25.}$$

3.7.2.6. Porosidad (ε): Se calculó con los datos de la densidad aparente y densidad real mediante la Ecuación 26 (Mohsenin, 1970).

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{\rho_r}{\rho_a} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 26.}$$

Dónde: ε es la porosidad en %, (ρ_a) es la densidad aparente en kg m^{-3} (ρ_r) es la densidad real en kg m^{-3} .

3.7.3. Color

Los valores de color de las tres variedades de quinua se analizaron en términos de L^* [luminosidad (0-100)], a^* [verde ($-\infty$), rojo (∞)], b^* [azul ($-\infty$), amarillo (∞)] se determinaron mediante el análisis de imágenes digitales (Figura 13), las imágenes fueron tomados en vista superior, usando una cámara NIKKON D7000, lente D7000 4F – S DX con objetivo micro Nikkor 40mm marca Nikon, para cada semilla de quinua, ImajeJ extrajo las densidades de color rojo (R), verde (G) y azul (B), posteriormente se procesó con el programa Matlab para convertir los colores en L^* , a^* y b^* . Los colores fueron medidos de la superficie de granos con tres repeticiones (Jha et al., 2006). El croma (C^*) es una medida de cromaticidad, que define la pureza o saturación del color (McGuire, 1992). C^* y h se calcularon para el método de (Bernalte et al., 2003) por la Ecuación 27 y 28.

$$C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad \text{Ecuación 27.}$$

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad \text{Ecuación 28.}$$

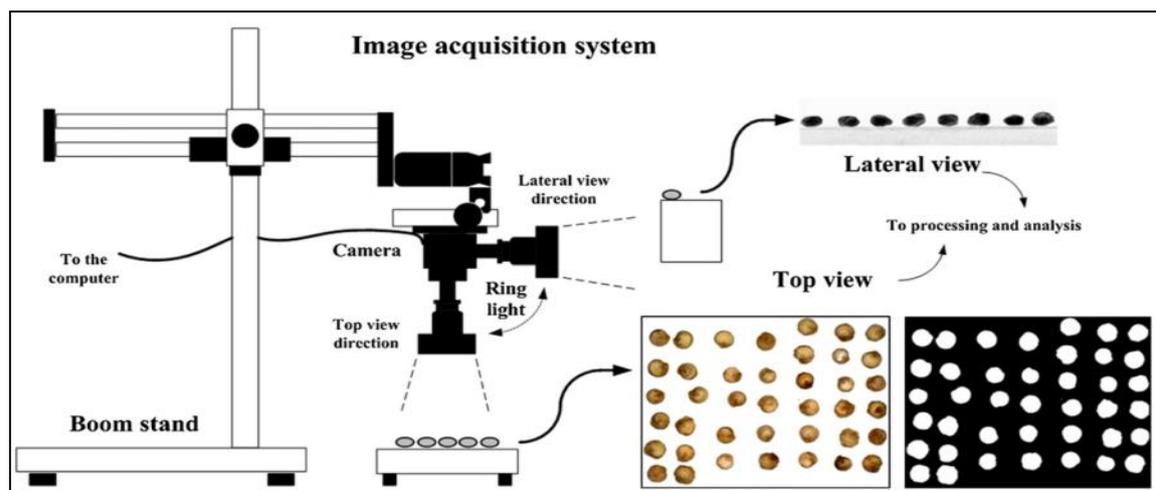


Figura 10: Metodología del proceso de imágenes (Medina et al., 2010).

3.8. Pruebas microestructurales por microscopio electrónico de barrido (SEM)

Se realizó los perfiles microestructurales mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) QUANTA 650, perteneciente a la Pontificia Universidad Católica del Perú, según la metodología (Aballe, 1996), las muestras fueron colocadas sobre un porta muestras de acero inoxidable en un cinta de carbono fijado y se introduce en un orden secuencial al microscopio debidamente codificado, luego se procede a fotografiar las muestras de quinua en su estado natural y en cortes transversales, posteriormente se analizó las formas y tamaños de las imágenes mediante el programa ImageJ, en un rango de referencias de 100 μm (Anexo 2)(Aballe, 1996).

3.9. Análisis estadístico

Para las isoterms de adsorción de ajustará mediante seis modelos matemáticos que son: G.A.B., Oswin, Henderson, Peleg, Halsey y Smith, y se evaluará el modelo matemático que ajuste adecuadamente los datos experimentales a las tres actividades de agua.

La investigación de las propiedades físicas se desarrolló con el método estadístico de análisis de varianza (ANVA), con un 95% de significancia y la prueba de Duncan para determinar las posibles diferencias entre los tratamientos y se trabajó con el programa estadístico Statgraphics centurión XVI versión 16.1.11, de igual manera para el tamaño de los gránulos de almidón en la microestructura de los granos de la quinua.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Isotermas de adsorción de tres variedades de quinua

En la Tabla 12 se muestra los valores experimentales de humedad de equilibrio (X_{eq}) de los granos de quinua en función a la actividad de agua, la humedad de equilibrio se alcanza después de 21 días. Como era de esperar el contenido humedad en equilibrio (CHE) aumentó a medida que la actividad de agua aumentara con diferentes porcentajes de adsorción de agua en cada variedad de quinua.

Tabla 12: Humedad de equilibrio de granos de quinua, variedad Salcedo INIA (SI), Pasankalla (PK) y Negra Collana (NC) a temperatura constante de 20°C.

a_w	Humedad en equilibrio (X_{eq})					
	SI - Puno	PK-Puno	NC - Puno	SI - Arequipa	PK - Arequipa	NC – Arequipa
0,112	4,777	4,3895	5,4971	5,032	3,5618	5,0034
0,657	13,01	13,1458	13,8676	12,422	12,5245	12,8986
0,979	47,098	46,641	44,4444	52,552	42,877	41,3339

En la presente investigación, en términos de actividad de agua de 0,657, los granos de quinua de la variedad Salcedo INIA cultivadas a 2500 m.s.n.m. alcanzaron contenidos de humedad de 12,42 % y a 3818 m.s.n.m. 13,01%; variedad Negra Collana de 12,89 y 13,86% y la variedad Pasankalla 12,52% y 13,14% respectivamente. Se ha determinado un comportamiento similar en granos de quinua de diferentes variedades (Tolaba et al., 2004; Vega-Gálvez et al., 2011).

Los contenidos máximos experimentales de humedad en equilibrio, con actividades de agua de 0,979, las variedades Negra Collana y Pasankalla cultivada a 3818 n.s.n.m. presentaron mayor adsorción de agua de 44,44% y 46,64% que las variedades cultivadas a 2500 m.s.n.m. con valores de 41,33% y 42,87%; lo que ocurre contrariamente en la variedad Salcedo INIA de 47,098% y 52,552% respectivamente. Estos resultados indican que las variedades Negra Collana y Pasankalla son menos higroscópicas cultivadas a 3818 n.s.n.m. que las cultivadas a 2500 m.s.n.m. donde puede ser influenciado por la cantidad de almidón, variedad, madures fisiología y el desarrollo fisiológico de la planta (altitud geográfica) y también la humedad temperatura. Miranda et al., (2012) indica una disminución en el contenido de humedad de equilibrio, en todos los niveles de a_w , con el aumento de la temperatura. Donde las moléculas en la etapa de vidrio pueden aproximarse a la región de transición vítrea y volverse plastificadas, aumentando así su movilidad y disponibilidad para

la sorción (Perdomo et al., 2009). El papel de la transición vítrea en productos ricos en almidón y cómo afecta su mecanismo de sorción ha sido estudiado por Al-Muhtaseb et al., (2004).

Los resultados obtenidos en este estudio confirman la premisa de Van den Berg (1981) en relación con la modificación de la capacidad de sorción alrededor de la región de transición donde la región amorfa de almidón comienza a plastificarse, aumentando su disponibilidad de grupos hidroxilo para la sorción de moléculas de agua (Brett et al., 2009).

Por otro lado, el almidón, es el componente principal de las semillas de quinua, que representa aproximadamente el 53.5-69.2% de la materia seca, contiene dos polímeros que contribuyen a su estructura molecular: la amilosa y amilopectina (Steffolani, León, & Pérez, 2013). Ambas moléculas forman estructuras semicristalinas (con capas cristalinas y amorfas) donde la mayoría de las regiones cristalinas están formadas por amilopectina, aunque parte de las moléculas de amilosa también están presentes en ellas (Lindeboom, Chang, & Tyler, 2004).

Dentro de un sistema de este tipo, las zonas amorfas son más accesibles al agua que las regiones cristalinas en las que las interacciones intermoleculares entre las cadenas son demasiado fuertes para permitir la penetración del disolvente. En consecuencia, el agua influye en la estructura actuando como un plastificante de las regiones amorfas (Al-Muhtaseb et al., 2004).

En la Figura 11, se presenta las curvas de isoterma de adsorción de granos de quinua cultivadas en dos altitudes (2500 y 3018 m.s.n.m.), observándose en el rango de 0,1 a 0,99 de a_w , las curvas varían entre variedades; la variedad Salcedo INIA cultivada a 2500 m.s.n.m, presenta mayor adsorción de agua que las variedades Pasankalla y Negra Collana. Esto posiblemente debido al porcentaje de almidón, variedad, madures fisiología y el desarrollo fisiológico de la planta (altitud geográfica).

Adicionalmente se observa en las isotermas que, a valores de a_w menores a 0,6 el incremento de humedad de equilibrio fue mucho menor que a mayores a_w , lo que traduce en la forma sigmoidea de la isoterma, pudiendo ser catalogada del tipo II según la clasificación de Brunauer et al., (1938), que es la forma típica de las isotermas de los alimentos con frecuencia en cereales, granos y semillas (Mathlouthi & Rogé, 2003; Samapundo et al., 2007).

La intercepción de las isotermas de las diferentes variedades de quinua cultivadas a dos altitudes para $> 0,80 a_w$, podría asociarse con un aumento en la solubilidad de los hidratos de carbono, la actividad enzimática y la movilidad de las moléculas de agua que conducen a la modificación de las interacciones químicas entre el agua y la matriz sólida (Perdomo et al., 2009).

Los granos de quinua con una actividad de agua inferior a 0,65 con 13% de humedad se pueden almacenar durante largos períodos sin riesgo de crecimiento de moho y otros daños fisicoquímicos (Abdullah et al., 2000; NTP, 2009). Por otra parte, el contenido de humedad del grano de quinua es un parámetro de calidad que se utiliza para determinar el precio del producto (Arapa et al., 2015).

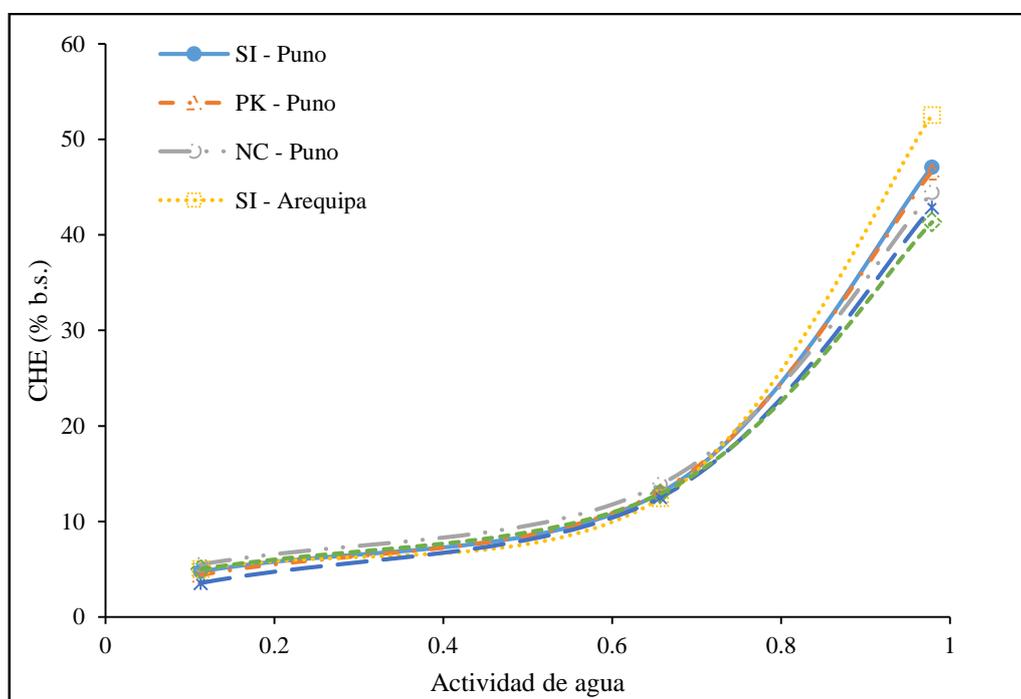


Figura 11: Curvas de retención de agua de tres variedades cultivadas a en Puno (3818 m.s.n.m.) y Arequipa (2500 m.s.n.m.).

4.1.1. Ajuste a los modelos matemáticos de las isotermas de adsorción

En la Tabla 13 se presenta los resultados de los cálculos de los modelos matemáticos de G.A.B., Oswin, Henderson, Peleg, Smith y Halsey, a temperatura de 20 °C, además se indican los valores de R^2 y el %E., considerando que tienen características particulares de cada modelo a ciertos rangos de a_w .

Tabla 13: Ajuste de datos experimentales, obtenidos para las isotermas de sorción de granos de quinua de tres variedades (Salcedo INIA, Negra Collana y Pasankalla).

Modelo	Constante	Salcedo INIA.		Negra Collana.		Pasankalla.	
		Puno	Arqp.	Puno	Arqp.	Puno	Arqp.
G.A.B.	X_m	0,0448	0,0380	0,0470	0,0450	0,0430	0,0390
	C	43,5086	22,3100	35,7420	42,5120	55,9420	20,1795
	K	1,4634	1,5470	1,3170	1,3920	1,5650	1,8150
	R^2	0,7530	0,7530	0,7750	0,7710	0,7100	0,7313
	%E	1,7364	1,1817	2,3373	1,3988	2,9344	1,0101
OSWIN	A	10,6200	12,0149	13,8495	13,0878	12,0470	10,6927
	B	0,3875	0,3841	0,3035	0,2993	0,3523	0,3615
	R^2	0,9966	1,0000	0,9985	0,9980	0,9992	0,9990
	%E	4,9228	2,5945	11,4676	13,5838	10,7780	14,0104
HENDERSON	K	-1,9930	-1,9120	-2,1780	-2,1220	-1,8970	-1,7800
	N	1,3510	1,2700	1,4840	1,4790	1,2850	1,2510
	R^2	0,8830	0,8490	0,8870	0,8940	0,8770	0,8870
	%E	1,0000	0,8486	0,8630	0,8488	0,9459	0,8014
PELEG	k_1	36,1920	43,1193	32,0116	27,4206	36,9248	33,9075
	n_1	5,2053	6,0448	4,9655	6,0346	5,2304	5,3976
	k_2	14,8558	14,7785	15,7956	17,4181	13,7472	12,7974
	n_2	0,5188	0,4921	0,4823	0,5671	0,5215	0,5842
	R^2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	%E	0,0064	0,0001	0,0165	0,1942	0,0010	0,0002
SMITH	A	7,2227	3,5254	4,2618	3,8508	3,0494	2,3144
	B	10,3220	12,6902	10,4006	9,7033	11,2837	10,4997
	R^2	0,9998	0,9986	0,9983	0,9975	1,0000	1,0000
	%E	30,3709	3,6369	2,9245	3,4933	0,0505	0,0633
HALSEY	A	2,0017	2,1950	5,5922	4,8403	2,4647	2,5210
	B	1,1803	1,1709	1,4691	1,4589	1,2374	1,2711
	R^2	0,9588	0,9759	0,9589	0,9550	0,9655	0,9672
	%E	52,3772	51,1560	43,6762	43,9921	49,1140	46,1168

La Tabla 13 muestra las constantes de ajuste de los seis modelos matemáticos, considerando un buen ajuste de los datos experimentales con un %E menor al 10 % y R^2 cercano a 1 (Lomauro et al., 1985). El modelo de Peleg describe mejor los datos experimentales en todas las variedades cultivadas en dos altitudes (con un valor de %E 0,01 – 0,165% y R^2 1), seguido por el modelo Henderson (valor de %E 0,8486 - 1 y R^2 0,88) y el modelo GAB (con %E 1,0101 – 2,9344 y R^2 0,77), las curvas de los ajustes de los modelos matemáticos se muestran en el Anexo 1. Como el modelo GAB es un modelo teórico importante y se usa ampliamente en los alimentos, se eligió para ajustar los valores experimentales (se muestra en la Figura 10).

Las isotermas de adsorción de granos de quinua mostraron la forma sigmoide típica del Tipo II, según la clasificación BET (Figura 10), de acuerdo con los resultados obtenidos para el almidón de quinua y granos de quinua (Pumacahua et al., 2016), polvos de almidón (Al-Muhtaseb et al., 2004) y otros productos alimenticios (Bejar, Mihoubi, & Kechaou, 2012).

MODELO MATEMATICO GAB.

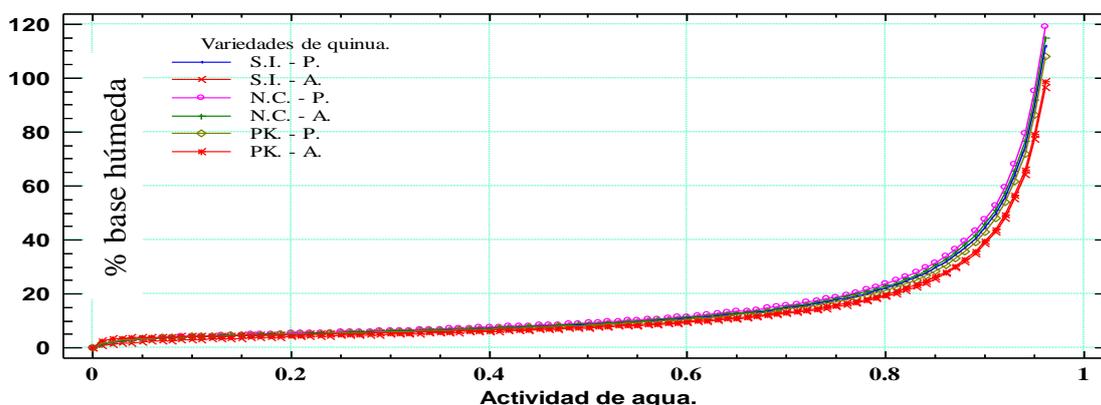


Figura 12: Isotermas de sorción con el modelo matemático G.A.B.

El modelo matemático GAB permite la evaluación de los valores de contenido de humedad de la monocapa (X_m) de los alimentos. Este es un parámetro importante en el almacenamiento y deterioro de los alimentos (Lomauro et al., 1985). Los valores del contenido de humedad monocapa de la quinua estimada con el modelo GAB se pueden observar en la Tabla 13.

El valor del contenido de humedad de la monocapa (X_m) fue menor en todas las variedades reportados por Pumacahua et al., (2016) determinaron valores de monocapa para semillas de quinua entre 0.087-0.059 g agua/g bs; Tolaba et al., (2004) 0,62 g agua/g bs en

semillas de quinua, pero fue superior a los granos de amaranto (0.0102 g agua/g bs (Calzetta Resio et al., 1999).

La humedad de la monocapa corresponde a la humedad del producto cuando los puntos de adsorción primarios están saturados por moléculas de agua, C y k son constantes de energía. C representa la diferencia de potencial químico de las moléculas de soluto entre capa se sorción superiores a la monocapa y K es la relación entre el potencial químico de las moléculas de soluto en estado líquido puro y en capas de sorción superiores (Timmermann et al., 2001).

De acuerdo con las pruebas estadísticas, el modelo de Peleg describe mejor los datos experimentales en todas las variedades cultivadas en dos altitudes (con un valor de %E 0,01 – 0,165% y $R^2 = 1$), lo que demuestra la capacidad de este modelo para predecir los datos de isoterma de sorción, también llegó a la misma conclusión (Ouafi et al., 2015; Pumacahua et al., 2017; Tolaba et al., 2004).

4.2. Propiedades físicas

4.2.1. Forma

En la Figura 13 se presenta las microfotografías de los granos de quinua enteros de las tres variedades de quinua cultivadas en dos altitudes con un aumento de 60x, las microfotografías fueron tomadas en posición de reposo de los granos. En ellas se puede distinguir las partes del fruto de quinua indicadas por Tapia et al (1979) como el embrión, perisperma, epispermo.

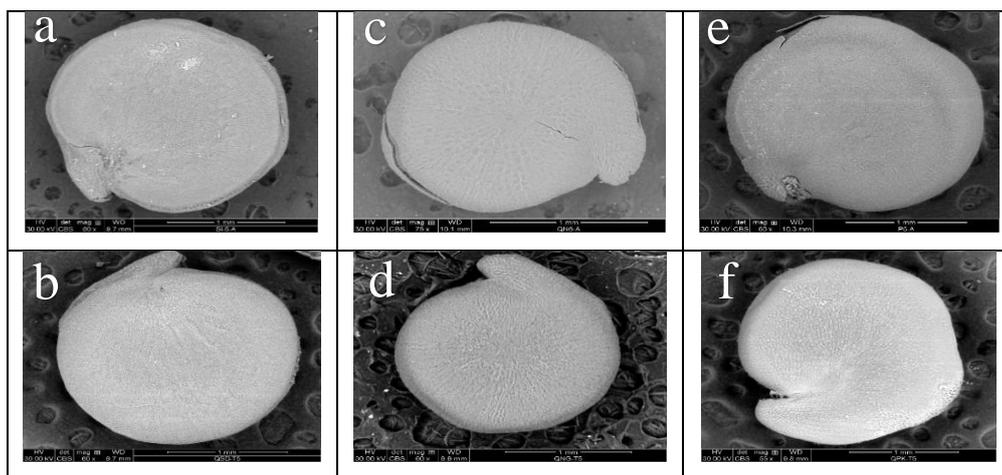


Figura 13: Microfotografías de granos de quinua en posición de reposo, (a) Salcedo INIA, (c) Negra Collana (e) Pasankalla cultivadas a 2500 m.s.n.m.; (b) Salcedo INIA (d) Negra Collana (f) Pasankalla cultivadas a 3018 m.s.n.m.

La forma de los granos enteros en la posición de reposo, se acerca a la de un círculo, prolato esferoide, lenticular y elipsoidal con una ligera protuberancia hacia el exterior, la cual corresponde a la radícula. En la Figura 13a y 13e se pueden observar restos de saponina en el pericarpio y el embrión y en la Figura 13f en el pericarpio. Azcón-Bieto & Talón, (2003) menciona que la adherencia de la saponina en el pericarpio varía entre las variedades de cada genotipo y el lugar geográfico donde se cultivó la planta, para lo cual indica mayor tratamiento para la extracción de saponina por método húmedo, seco o mixto de cada variedad de quinua.

4.2.2. Tamaño

Las dimensiones de las semillas de quinua de diámetro mayor, menor, espesor, geométrico, esfericidad y área superficial se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Propiedades geométricas de tres variedades de quinua cultivadas en dos altitudes geográficas.

Altitud geográfica (m.s.n.m.)	Variedades de quinua	Diámetro (mm)				Esfericidad %	Área superficial mm ²
		Mayor (L)	Menor (A)	Espesor (H)	Geométrico Dg		
2500	Salcedo						
	INIA	1,970	1,888	1,041	1,567	79,509	7,716
	Negra						
	Collana	1,840	1,805	1,006	1,494	81,409	7,015
	Pasankalla	1,602	1,503	0,903	1,294	80,870	5,264
3800	Salcedo						
	INIA	1,632	1,637	1,023	1,397	85,733	6,135
	Negra						
	Collana	1,935	1,868	1,085	1,575	81,505	7,790
	Pasankalla	2,052	1,980	1,172	1,682	82,019	8,887

En la Tabla 14 se presentan las propiedades geométricas de las semillas de quinua de diferentes variedades Salcedo INIA, Negra Collana y Pasankalla. Los menores diámetros (mayor, menor y espesor) en las semillas de quinua se obtuvieron valores de 1.60 mm, 1.503 mm y 0,903 mm variedad Pasankalla cultivada a 2500 m.s.n.m., mientras que los mayores diámetros se obtuvieron de la misma variedad cultivada a 3018 m.s.n.m. con valores de 2,052mm, 1,980 mm y 1,72 mm respectivamente.

El diámetro geométrico (D_g), esfericidad y el área superficie de las semillas de tres variedades de quinua, están en un rango de 1.294 a 1.575 mm, 79,509% a 85.870% y 5.264 a 8.887 mm² respectivamente (Tabla 14). Los mayores diámetros geométricos y áreas superficiales se encontraron en las variedades Pasankalla y Negra Collana cultivadas a 3800 m.s.n.m. que las cultivadas a 2500 m.s.n.m., en la variedad Salcedo INIA presenta mayor diámetro geométrico y área superficial cultivada a 2500 m.s.n.m. que las cultivadas a 3818 m.s.n.m.

La esfericidad de las semillas de quinua varió de 79% a 85% (Tabla 14). Los datos experimentales mostraron mayor esfericidad en granos de quinua cultivadas a 3800 m.s.n.m. que las variedades cultivadas a 2500 m.s.n.m. Las semillas de quinua presentan una esfericidad similar al frijol de soja (Deshpande, Bal, & Ojha, 1993).

Vilche et al., (2003) determinó el diámetro mayor, menor y espesor de semillas de quinua cultivadas a una altitud de 1246 msnm (Argentina) de 2,045 a 1,691 mm, 2,015 a 1,689 mm y 0,930 a 0,973 mm a 15% de contenido de humedad en base seca. Diámetro equivalente 1,506 mm, esfericidad 0,788, según los resultados de la Tabla 14. El diámetro mayor y menor están dentro del reportado por (Vilche et al., 2003), pero las semillas cultivadas a 2500 y 3818 msnm presentan mayor esfericidad y espesor a lo reportado por (Vilche et al., 2003).

Zewdu (2011) determinó diámetro menor, mayor y espesor de semillas de Ajwain que oscila de 1,15 a 1,22 mm, de 1,91 a 2,20 mm y de 0,87 a 0,93 mm bajo diferente contenido de humedad (de 4.39 a 21.6%). Ixtaina et al., (2008) determinaron diámetro geométrico de semillas de chía que oscilaba de 1,31 a 1,36 mm. Abalone et., (2004) determinaron el diámetro mayor, menor, espesor, geométrico y esfericidad de semillas de amaranto, se encontraron valores de 1.42 mm, 1.26 mm, 0.84 mm, 1.14 mm y 0,82 respectivamente. Los resultados de las propiedades geométricas de Ajwain, Chia y Amaranto sin inferiores a las variedades estudiantes en esta investigación.

Según la Norma Técnica Peruana (NTP, 2009), las variedades cultivadas a 3818 m.s.n.m. son consideradas grandes (Negra Collana y Pasankalla) y mediano (Salcedo INIA), mientras que las variedades cultivadas a 2500 m.s.n.m. son consideradas mediano (Salcedo INIA y Negra Collana) y pequeño (Pasankalla) respectivamente, esta variación es por factores del tipo de suelo, agua, precipitaciones pluviales, altitud geográfica y condiciones medioambientales.

La variedad Salcedo INIA presenta diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza, mientras en las variedades Negra Collana y Pasankalla no muestran diferencias significativas entre las mismas variedades cultivadas a diferentes altitudes (Anexo 3).

4.2.3. Densidad

Las densidades de las tres variedades de quinua cultivadas a diferentes altitudes se presentan en la Tabla 15. Parámetros son importantes para el diseño de equipos, empaques y almacenamiento.

Tabla 15: Densidad de las tres variedades de quinua cultivadas en dos altitudes.

Altitud geográfica (m.s.n.m.)	Variedades de quinua	Densidad aparente kg m^{-3}	Densidad real kg m^{-3}	Porosidad (%)
2500	Salcedo INIA	750	966,7	22,42
	Negra Collana	785	1050,5	24,66
	Pasankalla	805	1068,5	24,66
3818	Salcedo INIA	805	993,6	18,98
	Negra Collana	695	1097,8	36,69
	Pasankalla	715	1069,7	33,16

Se determinó densidad aparente, densidad real y porosidad de semillas de quinua (Tabla 15) varió de 710 a 805 kg m^{-3} , 993,6 a 1079 kg m^{-3} y 18,98 a 33,16% respectivamente. El valor alto de porosidad se encontró en la variedad Pasankalla y el valor bajo la variedad Salcedo INIA, ambas cultivadas a 3818 m.s.n.m., mientras en las variedades cultivadas a 2500 m.s.n.m. se encuentran en un rango de 22,42 a 24,66%.

Vilche et al., (2003), determinaron la densidad aparente, real y porosidad para semillas de quinua, los resultados variaban de 667 a 747 kg m^{-3} , 928 a 1118 kg m^{-3} , y 19 a 43%, estos resultados son similares encontrado en las tres variedades de quinua cultivadas a diferentes altitudes (Tabla 15). La densidad real de las semillas de quinua (Tabla.) fue menor que las semillas de comino y alcaparra (Dursun & Dursun, 2005; Singh & Goswami, 1996), mientras que la densidad aparente fue mayor.

Los valores de densidad aparente aportan información útil para el análisis de la transferencia de calor a través de los granos, control de calidad, diseño de sistemas de transporte, limpieza y clasificación y la densidad real para el diseño de sistemas de almacenaje, empaque, deshidratación y transporte.

La variedad Salcedo INIA diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza, mientras en las variedades Negra Collana y Pasankalla no muestran diferencias significativas (Anexo 3).

4.2.4. Color

En la Tabla 16 se muestra los colores de los granos de quinua de las tres variedades cultivadas en diferentes altitudes.

Tabla 16: Color de tres variedades de quinua cultivadas a dos altitudes.

Altitud geográfica (m.s.n.m.)	Variedades	L*	a*	b*	C	H
2500	Salcedo INIA	80.8304	-0.3332	2.1168	2.1429	-1.4147
	Negra Collana	43.1217	3.0441	-1.2876	3.3052	-0.4002
	Pasankalla	65.841	8.6704	24.1008	25.6130	1.2255
3818	Salcedo INIA	85.704	-0.556	1.5295	1.6274	-1.2221
	Negra Collana	34.1472	2.7447	-2.3774	3.6312	-0.7138
	Pasankalla	54.5424	8.5654	19.80799	21.5806	1.1627

Las características de color (ligereza, enrojecimiento y amarillez) de las diferentes variedades de quinua y cultivadas en dos altitudes se presentan en la Tabla 16 los resultados fueron obtenidos mediante análisis de imágenes, las mediciones corresponden a la capa exterior (pericarpio) de las semillas bajo condiciones fisiológicas normales. El valor máximo de luminosidad (L*) se registró en la variedad Salcedo INIA (quinua blanca) de 85,704, mientras que el valor mínimo de L* se registró como 34,14 para variedad Negra Collana (quinua negra) ambas variedades fueron cultivadas a 3818 m.s.n.m., como era de esperar estos valores indican claramente una luminosidad reducida de los granos de color negro y la ausencia de un color predominante. Los valores de croma variaron en el rango de 1,6274 a 25,6130, la variedad Salcedo INIA presentó valores bajos y la variedad Pasankalla presento el valor más alto, mientras en la tonalidad (H) variaron de 0,4002 a 1,4147, la variedad Pasankalla presentó valores más altos y la variedad Negra Collana presentó valores bajos cultivadas en dos altitudes.

La variedad Salcedo INIA cultivada a 3818 m.s.n.m., presenta alta luminosidad L^* 85,704, mientras que la cultivadas a 2500 m.s.n.m. L^* 80,8304, esta variedad se por colores bajos en a^* que indican la ausencia de intensidad de rojo a verde y b^* valores que se refieren a un fondo de amarillo pálido crema. En contraste, las variedades Negra Collana y Pasankalla cultivadas a 2500 3818 msnm presentan mayor L^* 43,1217 y 65,84 que las cultivadas a 3818 msnm con valores de L^* 34,14 y 54,54 respectivamente, la disminución de la L^* de las diferentes variedades de quinua indica una contribución mayor de betacianinas (Escribano et al., 2017). Los parámetros de b^* color amarillo demuestran una contribución de betaxantinas, para aquellos colores de quinua rojo-violeta contienen betaxantinas y betacianinas. Escribano et al., (2017) demostraron que a medida que se reduce la proporción de betaxantina, el valor del parámetro b^* disminuye, que mide el color amarillo, al mismo tiempo, el valor del parámetro a^* aumenta debido al mayor contenido de betacianinas, estos valores se pueden comparar en la Tabla 16.

Un cambio del ángulo de matiz (H) también está vinculado a la proporción más baja de betaxantinas disminuyendo desde las variedades amarillas hacia aquellos que contienen más betacianinas y por lo tanto exhiben el color de rojo a violeta.

Los resultados de L^* , a^* y b^* son similares a los reportado por Arapa et al., (2015) determinaron el color de granos de quinua, obteniendo los siguientes resultados L^* 76,16; a^* 3,79 y b^* 25,99 y Escribano et al., (2017) determinó el color de la variedades blancas (Blanca Junin, Rosada Huancayo), con valores de luminosidad L^* 72,04-75,6. Variedad Negra Collana con valores de L^* 41.57- 45.26, a^* 0,89-2,26, b^* 2,80- 8,51 y granos amarillos, con valores de L^* 60,76-67,01, a^* 6,41-12,94, y b^* 26,81-28,78.

Las diversidades de colores presentes en los granos de quinua ofrecen múltiples posibilidades de caracterizar mediante análisis de imágenes es una alternativa amigable con el medio ambiente de bajo y costo y de uso práctico a partir de estos datos dar un valor agregado aprovechando sus características de color como por ejemplo en la extracción de polvos de color vegetal o harinas adecuadas a diferentes aplicaciones en la industria alimentaria. Según los resultados de comparación entre las variedades de quinua existe una diferencia estadísticamente significativa entre las variedades con un nivel del 95.0% de confianza (Anexo 3).

4.3. Microestructura

El tamaño de los gránulos de almidón se analizó por microscopía electrónica de barrido (SEM). Las muestras fueron examinadas bajo alto vacío en un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo, para el procesamiento de las imágenes, se utiliza la interfaz de usuario de control de SEM, las micrografías representativas fueron tomadas de cada tipo de almidón con aumentos entre 500x y 600x. El diámetro del gránulo de almidón se midió promediando la dimensión mayor de diez gránulos de almidón a partir de tres micrografías con el análisis de imágenes. En las Figuras 14, 15 y 16 se presentan las microfotografías de las muestras de quinua a diferentes actividades de agua.

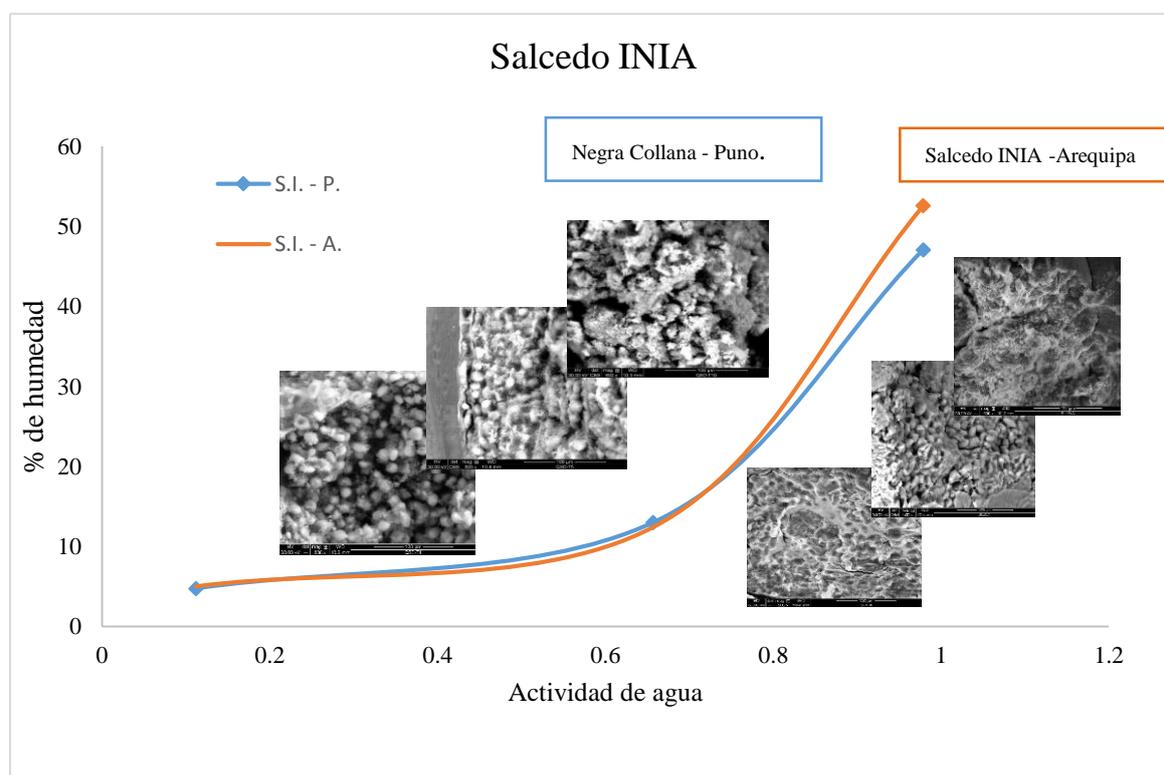


Figura 14: Microestructura de la variedad Salcedo INIA

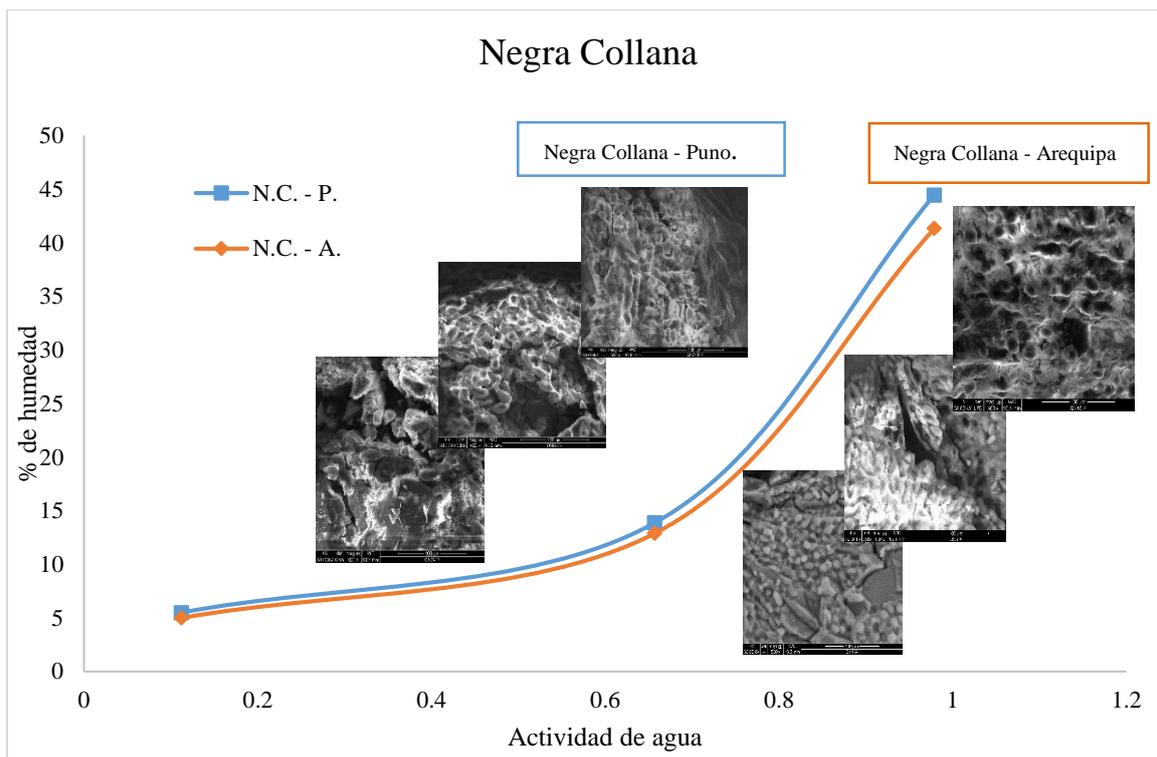


Figura 15: Microestructura de la variedad Negra Collana

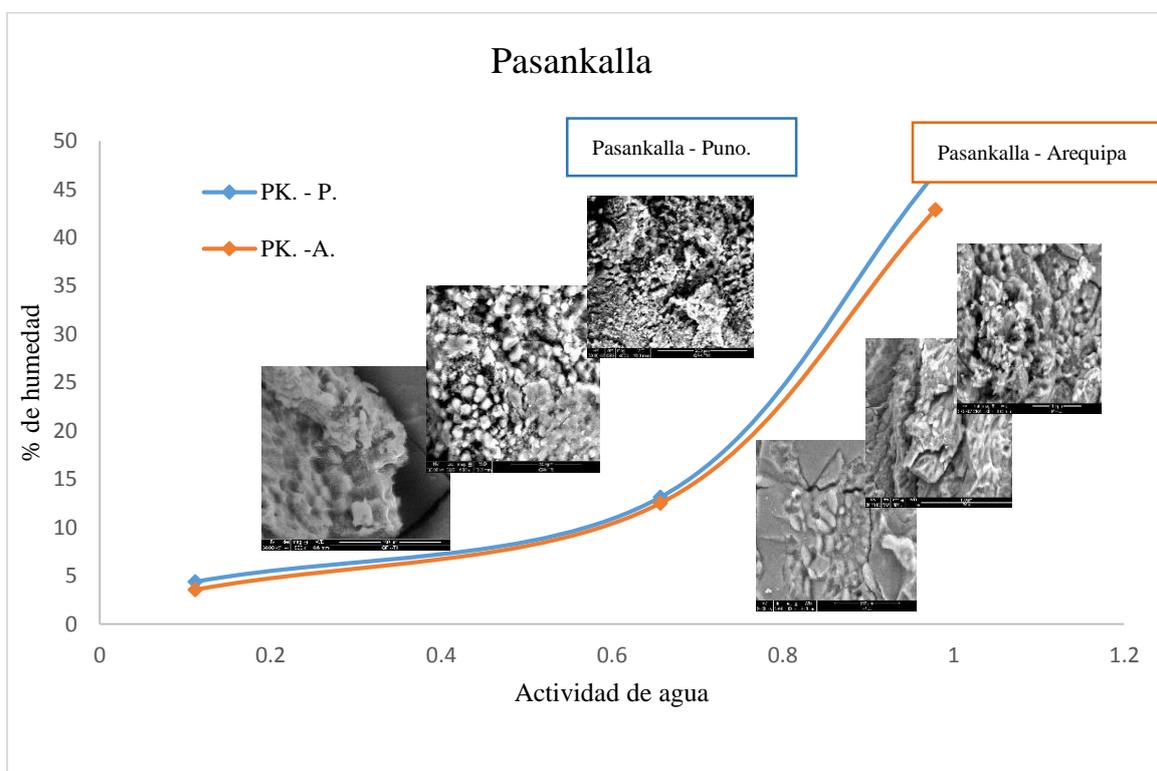


Figura 16: Microestructura de la variedad Pasankalla

En la Figura 14, 15 y 16 se observa los gránulos de almidón de las variedades de Salcedo INIA, Negra Collana y Pasankalla respectivamente. La variedad Salcedo INIA cultivada a 3818 m.s.n.m. presentan formas esféricas con diámetros que varían de 9 a 18,5 μm , y los granos cultivados a 2600 m.s.n.m presentan formas oblongas con diámetros que varían de 5 a 12 μm (Figura 14), estos resultados son similares a los reportado por Capriles & Areas, (2013), observaron formas esféricas de gránulos de almidón en harina de quinua.

La variedad Negra Collana, presenta empaquetamientos de almidones de formas oblongos con diámetros promedio de 20 μm , estos parámetros fueron similares en ambas altitudes (Figura 15). Estos gránulos de almidón presentan formas y tamaños similares a los gránulos de almidón de trigo (Dhital et al., 2011).

La variedad Pasankalla, presentan formas esféricas con tamaños que varían de 12 a 14 μm cultivadas a 3818 m.s.n.m. mientras las cultivadas a 2600 m.s.n.m presentan formas oblongas con diámetros que varían de 13 a 30 μm (Figura 16). Estos resultados están de acuerdo con los resultados de la quinua la cual tiene morfologías esféricas o ligeramente cóncavas (Wolter et al., 2013). Además presenta mayor cristalinidad la cultivada en la región altiplánica por lo que es una parámetro de alto contenido de amilopectina (Pumacahua et al., 2016).

En general, los tamaños de los gránulos de almidón varían de 5 a 30 μm en las tres variedades de quinua, que son similares a lo reporta por Hernández et al., (2004), que evaluó el tamaño de almidón de maíz que esta entre 8 a 20 μm , esta variación de forma y tamaño entre variedades también estas variaciones entre variedades dependen mucho de la fuente botánica, variedad genética, condición de cultivo de la cual se obtuvieron las muestras (Tester, Karkalas, & Qi, 2004). Atwell et al., (1983) determinó formas poligonales con tamaños que varían entre 0.4 a 2.0 μm , estas variación de tamaños y formas reportados por (Atwell et al., 1983; Galwey, 1992), comparados con los resultados de nuestra investigación de debe a la forma de la caracterización del almidón, en nuestros caso se analizó la superficie que se presenta de la manera natural sin ningún proceso de purificación del almidón de quinua. Los empaquetamientos de 18 a 20 μm pueden contener hasta 14, 000 gránulos pequeños de almidón (Varriano-Marston & Defrancisco, 1984).

CONCLUSIONES

Las variedades Negra Collana y pasankalla cultivados a 2600 m.s.n.m. presentaron mayor capacidad de adsorción de agua, de igual manera la variedad Salcedo INIA cultivada a 3818 m.s.n.m. El modelo matemático Peleg representa mejor los datos experimentales de las isotermas de sorción en las tres variedades de quinua.

Las propiedades geométricas de las semillas de quinua variaron de 1.397 – 1.683 mm, las variedades Negra Collana y Pasancalla cultivadas a 3018 n.s.n.m presentaron valores altos que cultivadas a 2600 m.s.n.m, mientras la esfericidad está cerca de 0.85. Las mayores densidades se encontraron en semillas cultivadas a 2600 m.s.n.m. que varían de 966,7 a 1097,8 kg/m³. Los valores altos de *L (Lminosidad) se obtuvieron en la variedad Salcedo INIA cultivada a 3818 m.s.n.m. con valores de 80-85, de igual manera en las variedades Negra Collana y Pasankalla cultivadas a 2600 m.s.n.m.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el microscopio electrónico de barrido (SEM) se observaron gránulos de almidón en forma esférica y oblongo con tamaños que varían de 10 a 25 μm , y con superficie ligeramente uniforme con presencia de algunas grietas y fisuras ligeramente visibles > 0.8 de actividad de agua.

RECOMENDACIONES

- ✚ Realizar investigaciones con más variedades de quinua cultivadas a diferentes altitudes a nivel nacional e internacional.
- ✚ Realizar las propiedades fisicoquímicas de las quinuas cultivadas a diferentes altitudes y correlacionar con el tipo de suelo.
- ✚ Realizar análisis de imágenes y analizar la cristalinidad de los gránulos de almidón de quinua cultivadas a diferentes altitudes.
- ✚ Realizar estudios en la evaluación de la textura relacionando la humedad absorbida para realizar diversos productos alimenticios

BIBLIOGRAFÍA

- Abalone, R., Cassinera, A., Gastón, A., & Lara, M. A. (2004). Some physical properties of amaranth seeds. *Biosystems Engineering*, 89(1), 109–117.
- Aballe, M. J. (1996). Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de rayos X. CSIC, Editoria: Consejo Superior de investigaciones Cientificas. Madrid - España.
- Abderrahim, F., Huanatico, E., Segura, R., Arribas, S., Gonzalez, M. C., & Condezo-Hoyos, L. (2015). Physical features, phenolic compounds, betalains and total antioxidant capacity of coloured quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) from Peruvian Altiplano. *Food Chemistry*, 183, 83 - 90.
- Abdullah, N., Nawawi, A., & Othman, I. (2000). Fungal spoilage of starch-based foods in relation to its water activity (aw). *Journal of Stored Products Research*, 36(1), 47–54.
- Aguerre, J., Viollaz, P. E., & Suarez, C. (1996). A fractal isotherm for multilayer adsorption in foods. *Journal of Food Engineering*, 30, 227–238.
- Agrodata. (2016). Exportaciones de quinua peruana. Obtenido de <http://www.agrodataperu.com/category/quinua-exportacion>
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A., & Magee, T. R. (2004). Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. *Journal of Food Engineering*, 62(2), 135–142.
- Altuntas, E., & Karadag, Y. (2006). Some physical mechanical properties of sainfoin, grasspea y bitter veach seeds. *Journal of Applied Sciences*, 6(6), 1373–1379.
- Anabalón, R. L., & Thomet, I. M. (2009). Comparative analysis of genetic and morphologic diversity among quinoa accessions (*Chenopodium quinoa* Willd.) of the South of Chile and highland accessions. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 1(5), 210–216.
- Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R., & Pinedo, R. (2013). *Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú*, (1^{ra} Edición). Lima - Perú, 79.
- Arapa Carcasi, P., & Padrón Pereira, C. (2015). Determinación de características físicas en semillas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd .) mediante procesamiento digital de imágenes. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5(2), 148–165.
- Argyropoulos, D., & Müller, J. (2014). Changes of essential oil content and composition during convective drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). *Industrial Crops and Products*, 52, 118 - 124.
- Atares, L. (2013). Determinación de la densidad de sólidos y líquidos. *Departamento de Tecnología de Alimentos, ETSIAMN (Universidad Politécnica de Valencia)*, 5 p.

- Atwell, W., Patrick, B. M., Johnson, L., & Glass, R. W. (1983). Characterization of quinoa starch. *Cereal Chem.*, 60(1), 9 - 11.
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2003). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Editorial McGrawHill. Barcelona - España.
- Badui Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos*. Cuarta edición. Editorial Pearson Educación. México. 736.
- Bala, B. K. (2017). *Drying and storage of cereal grains*. Primera edición. Editorial Wiley Blackwell. Pondicherry, India. 340.
- Bazile, D., Fuentes, F., & Mujica, a. (2013). Historical perspectives and domestication. *Quinoa: Botany, Production and Uses*, 16 - 35.
- Bejar, A. K., Mihoubi, N. B., & Kechaou, N. (2012). Moisture sorption isotherms - experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves. *Food Chemistry*, 132, 1728 - 1735.
- Bernalte, M. J., Sabio, E., Hernández, M. T., & Gervasini, C. (2003). Influence of storage delay on quality of “Van” sweet cherry. *Postharvest Biology and Technology*, 28(2), 303 - 312.
- Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2006). *Chenopodium quinoa* - An Indian perspective. *Industrial Crops and Products*, 23(1), 73 - 87.
- Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2007). Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 101(1), 104 - 116.
- Blahovec, J., & Yanniotis, S. (2009). Modified classification of sorption isotherms. *Journal of Food Engineering*, 91(1), 72 - 77.
- Boente, G., González, H. H. L., Martínez, E., Pollio, M. L., & Resnik, S. L. (1996). Sorption isotherms of corn- study of mathematical models. *Journal of Food Engineering*, 29(1), 115 - 128.
- Boquet, R., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods. II. Evaluation of various two - parameter models. *International Journal of Food Science & Technology*, 13, 319 - 327.
- Brady, K., Ho, C. T., Rosen, R. T., Sang, S., & Karwe, M. V. (2007). Effects of processing on the nutraceutical profile of quinoa. *Food Chemistry*, 100(3), 1209 - 1216.
- Brett, B., Figueroa, M., Sandoval, A. J., Barreiro, J. A., & Müller, A. J. (2009). Moisture sorption characteristics of starchy products: Oat flour and rice flour. *Food Biophysics*, 4(3), 151–157.

- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. *Journal of the American Chemical Society*, 62(7), 1723 - 1732.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309 - 319.
- Calzetta Resio, A., Aguerre, R. J., & Suárez, C. (1999). Analysis of the sorptional characteristics of amaranth starch. *Journal of Food Engineering*, 42(1), 51 - 57.
- Capriles, V. D., & Areas, J. A. G. (2013). Effects of prebiotic inulin-type fructans on structure, quality, sensory acceptance and glycemic response of gluten-free breads. *Food & Function*, 4, 104 - 110.
- Clemente Polo, G. (2003). Efecto de la contracción en la cinética de secado de musculos de jamón., Tesis Doctoral para obtener el grado de Doctora en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia- España. 323.
- Deshpande, S. D., Bal, S., & Ojha, T. P. (1993). Physical properties of soybean. *Journal of Agricultural Engineering Research*.
- Dhital, S., Shrestha, A. K., Hasjim, J., & Gidley, M. J. (2011). Physicochemical and structural properties of maize and potato starches as a function of granule size. *J. Agric. Food Chem.*, 59, 10151 - 10161.
- Dursun, E., & Dursun, I. (2005). Some physical properties of caper seed. *Biosystems Engineering*, 92(2), 237 - 245.
- Emanuel, D., Oliveira, C. De, Resende, O., & Campos, R. C. (2014). Obtenção e modelagem das isotermas de dessorção e do calor isostérico para sementes de arroz em casca Rough rice seed desorption isotherms and isosteric heat. *Científica*, 42(3), 203 - 210.
- Escribano, J., Cabanes, J., Jiménez-Atiénzar, M., Ibañez-Tremolada, M., Gómez-Pando, L. R., García-Carmona, F., & Gandía-Herrero, F. (2017). Characterization of betalains, saponins and antioxidant power in differently colored quinoa (*Chenopodium quinoa*) varieties. *Food Chemistry*, 234, 285 - 294.
- Espin, S. B. (1999). Composición química, valor nutricional y usos potenciales de siete especies de raíces y tubérculos andinos. *Ambato - Ecuador*.
- Estrada, R., Apaza, V., & Delgado, P. (2014). Tecnologías de Producción de quinua para el mercado interno y externo, curso modular virtual del Instituto Nacional de Innovación Agraria. 250 .
- FAO (2011). La quinua: cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. Estado Plurinacional de Bolivia en la 37ava Conferencia de la FAO. Bolivia.

- Fellows, P. J. (2000). *Food Processing Technology*. Segunda edición. Editorial Woodhead Publishing Limited. Cambridge - England.
- Fennema, O. R. (2000). *Química de Los Alimentos*. Segunda Edición. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza - España.
- Fischer, S., Wilckens, R., Jara, J., & Aranda, M. (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.
- Fuentes, F., & Bhargava, A. (2011). Morphological Analysis of Quinoa Germplasm Grown Under Lowland Desert Conditions. *J.of Agronomy and Crop Science*, 197(2), 124 - 134.
- Galwey, N. W. (1992). The potential of quinoa as a multi-purpose crop for agricultural diversification: a review. *Industrial Crops and Products*, 1(2 - 4), 101 - 106.
- Gely, M. C., & Santalla, E. M. (2007). Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 1029 - 1033.
- Geşiński, K. (2008). Evaluation of the development and yielding potential of *Chenopodium quinoa*. under the climatic conditions of Europe. *Acta Agrobotanica*, 61(1), 185 - 189.
- Guggenheim, E. A. (1966). Applications of statistical mechanics. Oxford: Clarendon Press.
- Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces. *Journal of Chemical Physics*, 16(10), 931 - 937.
- Heldman, Dennis R; Lund, D. (2006). Handbook of Food Engineering, Second Edition. *Crc Press Taylor & Francis Group*. London - New York.
- Hernández-, A. N., Solorza-feria, J., & Bello-pérez, L. A. (2004). Isolation and Partial Characterization of Mexican Oxalis tuberosa Starch. *Starch/Stärke*, 56, 357 - 363.
- Henderson, S. M. (1952). A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural engineering*, 33, 29 - 32.
- INIA. (1995). *Expediente de validacion tecnica y economica de la quinua variedad Salcedo INIA -EEA Illpa*. Puno.
- INIA. (2006). *Expediente de Validacion Tecnica y Economica de la quinua variedad INIA 415 Pasankalla - EEA Illpa*. Puno.
- INIA. (2008). *Expediente de Validacion Tecnica y Economica de la quinua variedad INIA 420 Negra Collana - EEA Illpa*. Puno.
- Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1976). Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. *J. of Food Sc. and Technology*, 11, 109 - 116.

- Ixtaina, V. Y., Nolasco, S. M., & Tomás, M. C. (2008). Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Industrial Crops and Products*, 28, 286 - 293.
- Jacobsen, S. E. (2003). The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1 - 2), 167 - 177.
- Jacobsen, S. E., Mujica, A., & Ortiz, R. (2003). La Importancia de los cultivos Andinos. *Revista Venezolana de Sociología y Antropología*, 13(36), 14 - 24.
- Jha, S. N., Kingsly, A. R. P., & Chopra, S. (2006). Physical and mechanical properties of mango during growth and storage for determination of maturity. *Journal of Food Engineering*, 72(1), 73 - 76.
- Kaymak-Ertekin, F., & Gedik, A. (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. *LWT - Food Science and Technology*, 37(4), 429 - 438.
- Krishna, S., Mridula, D., Barnwal, P., & Rehal, J. (2013). Selected engineering and biochemical properties of 11 flaxseed varieties. *Food and Bioprocess Technology*, 6(2), 598 - 605.
- Lang, K. W., & Steinberg, M. P. (1981). Prediction water activity from 0.30 a 0.95 of a multicomponent food formulation. *Journal of Food Science*, 46, 670 - 672.
- Lewicki, P. P. (1998). A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 21(2), 127 - 144.
- Li, G., Wang, S., & Zhu, F. (2016). Physicochemical properties of quinoa starch. *Carbohydrate Polymers*, 137, 328 - 338.
- Lindeboom, N., Chang, P. R., & Tyler, R. T. (2004). Analytical, Biochemical and Physicochemical Aspects of Starch Granule Size, with Emphasis on Small Granule Starches: A Review. *Starch - Stärke*, 56(3 - 4), 89 - 99.
- Lomauro, C. J., Bakshi, a S., & Labuza, T. P. (1985). Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, vegetable and meat products. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie*, 18(2), 111 - 117.
- Mäkilä, L., Laaksonen, O., Ramos Diaz, J. M., Vahvaselkä, M., Myllymäki, O., Lehtomäki, I., Kallio, H. (2014). Exploiting blackcurrant juice press residue in extruded snacks. *LWT - Food Science and Technology*, 57(2), 618 - 627.

- Marques Pedro, M. A. (2012). Influência de encapsulantes e do método de secagem nas propriedades físico-químicas e atributos de qualidade de polpa de maracujá (*Passiflora adulis* f. *flavicarpa*) em pó. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciencia de Alimentos, Área de Concentracao: Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Sao José doRio Preto, Sao Pauto- Brasil.
- Martínez, E. A., Veas, E., Jorquera, C., San Martín, R., & Jara, P. (2009). Re-introduction of Quínoa into arid Chile: Cultivation of two lowland races under extremely low irrigation. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(1), 1 - 10.
- Mathlouthi, M., & Rogé, B. (2003). Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders. *Food Chemistry*, 82(1), 61 - 71.
- McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 27(12), 1254 - 1255.
- Medina, W., Skurtys, O., & Aguilera, J. M. (2010). Study on image analysis application for identification Quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd) geographical provenance. *LWT - Food Science and Technology*, 43(2), 238–246.
- Miranda, M., Vega-Gálvez, A., Sanders, M., López, J., Lemus-Mondaca, R., Martínez, E., & Di Scala, K. (2012). Modelling the water sorption isotherms of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) and determination of sorption heats. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1686 - 1693.
- Mohsenin, N. . (1970). Physical properties of plant and animal materials. *Published by Gordon and Breach, New York*, 841.
- Mujica, A. (1996). Genetic Resources of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *FAO. Roma, Italia. en prensa*, 357 p.
- NTP. (2009). QUINUA (*Chenopodium quinua* Willd). Requisitos 205.062, N.T.P. Norma Técnica Peruana. Comisión de Normalización y de Fiscalización de Barreras No Arancelarios. INDECOPI. Lima, Perú.
- Olajide, J. O. O., & Ade-Omowaye, B. I. O. I. O. (1999). Some physical properties of locust bean seed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(2), 213 - 215.
- Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 65(12), 419 - 421.
- Ouafi, N., Moghrani, H., Benaouada, N., Yassaa, N., Maachi, R., & Younsi, R. (2015). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of Algerian bay leaves (*Laurus nobilis*). *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(4), 759 - 772.

- Ozarslan, C. (2002). Physical properties of cotton seed. *Biosystems Engineering.*, 83(2), 169 - 174.
- Peleg, M. (1993). Assessment of asemi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 16(1), 21 - 37.
- Perdomo, J., Cova, A., Sandoval, A. J., García, L., Laredo, E., & Müller, A. J. (2009). Glass transition temperatures and water sorption isotherms of cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 76(2), 305 - 313.
- Prego, I., Maldonado, S., & Otegui, M. (1998). Seed structure and localization of reserves in *Chenopodium quinoa*. *Annals of Botany*, 82(4), 481 - 488.
- Pumacahua, A., Gomez, J., Telis, J., Villa, H., & Lopes, J. (2016). Isotherms and isosteric heat of sorption of two varieties of Peruvian quinoa. *Scientia Agropecuaria*, 7(4), 409-417.
- Pumacahua, A., Limaylla, K. M., Telis, J., & Lopes, J. F. (2017). Isotermas y calor isostérico de adsorción de agua de almidón de quinua. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 15(1), 95 - 104.
- Pumacahua, A. R., Limaylla, K. M. G., Romero, J. T., & Lopes, F. F. J. (2016). Hydration kinetics of four quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties. *Rev. Colomb. Investig. Agroindustriales*, 8, 23–34.
- Raji, A. O., & Ojediran, J. O. (2011). Moisture sorption isotherms of two varieties of millet. *Food and Bioproducts Processing*, 89(3), 178 - 184.
- Razzaghi, F. A., Jacobsen, S. B., Jensen, C. R., & Neumann, M. A. (2014). Ionic and photosynthetic homeostasis in quinoa challenged by salinity and drought – mechanisms of tolerance. *Functional Plant Biology*, 13.
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Hellström, J. K., Pihlava, J. M., & Mattila, P. H. (2010). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry*, 120(1), 128 - 133.
- Repo-Carrasco, R., Espinoza, C., & Jacobsen, S. E. (2003). Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food Reviews International*, 19(1 - 2), 179 - 189.
- Rojas, W., Pinto, M., Alanoca, C., Gómez Pando, L., León-Lobos, P., Alercia, A., ... Bazile, D. (2015). Quinoa genetic resources and ex situ conservation. *State of the Art Report on Quinoa Around the World in 2013*, 56–82.

- Rojas, W. P. (2010). Granos Andinos: Avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, cañahua y amaranto en Bolivia. *Biodiversity International, Roma-Italia*
- Rosa, D. P., Cantú-Lozano, D., Luna-Solano, G., Polachini, T. C., & Telis-Romero, J. (2015). Modelagem matemática da cinética de secagem de semente de laranja. *Ciencia e Agrotecnologia*, 39(3), 291 - 300.
- Ruiz, K. B., Biondi, S., Oses, R., Acuña-Rodríguez, I. S., Antognoni, F., Martínez-Mosqueira, E. A., Molina-Montenegro, M. A. (2014). Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 349 - 359.
- Samapundo, S., Devlieghere, F., Meulenaer, B. De, Atukwase, A., Lamboni, Y., & Debevere, J. M. (2007). Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 168 - 175.
- Schuchmann, H. P., & Schuchmann, H. (2005). *Lebensmittelverfahrenstechnik: Rohstoffe, Prozesse, Produkte*. Wiley-VHC, Weinheim, Germany.
- Shafiur Rahman, M. (2009). *Food properties handbook*. Second edition. Editorial CRC Press Taylor & Francis Group. London - New York.
- Singh, K. K., & Goswami, T. K. (1996). Physical properties of cumin seed. *Journal Agricultural Engineering*, 64, 93 - 98.
- Smith, S. E. (1947). The sorption of water vapor by high polymers. *Journal of the American Chemical Society*, 69(3), 646 - 651.
- Sogi, D. S., Shivhare, U. S., Garg, S. K., & Bawa, A. S. (2003). Water sorption isotherm and drying characteristics of tomato seeds. *Biosystems Engineering*, 84(3), 297 - 301.
- Soto, E., D'attoma, L., & Torres, J. (2015). El mercado y la producción de quinua en el Perú. In *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)*. Lima.
- Steffolani, M. E., León, A. E., & Pérez, G. T. (2013). Study of the physicochemical and functional characterization of quinoa and kañiwa starches. *Starch/Staerke*, 65(11 - 12), 976 - 983.
- Tapia, M., Severo, I., Cahuana, A., Quispe, M., Gavidia, J., & Mescoco, J. (2014). Razas de quinuas del Peru. *Asociación Nacional de Productores Ecológicos (ANPE) y Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC)*, Lima, Perú, 173 .
- Tapia., M. (1999). Agrobiodiversidad en los Andes. *Fundación Friederich Ebert Stiftung*, 116.
- Tapia, M. Gandarillas, H. Alandia, S. Cardoso A. Mujica, A. (1979). *Quinua y Kañihua cultivos andinos* (CIID). Bogotá: Oficina Regional para la America Latina.

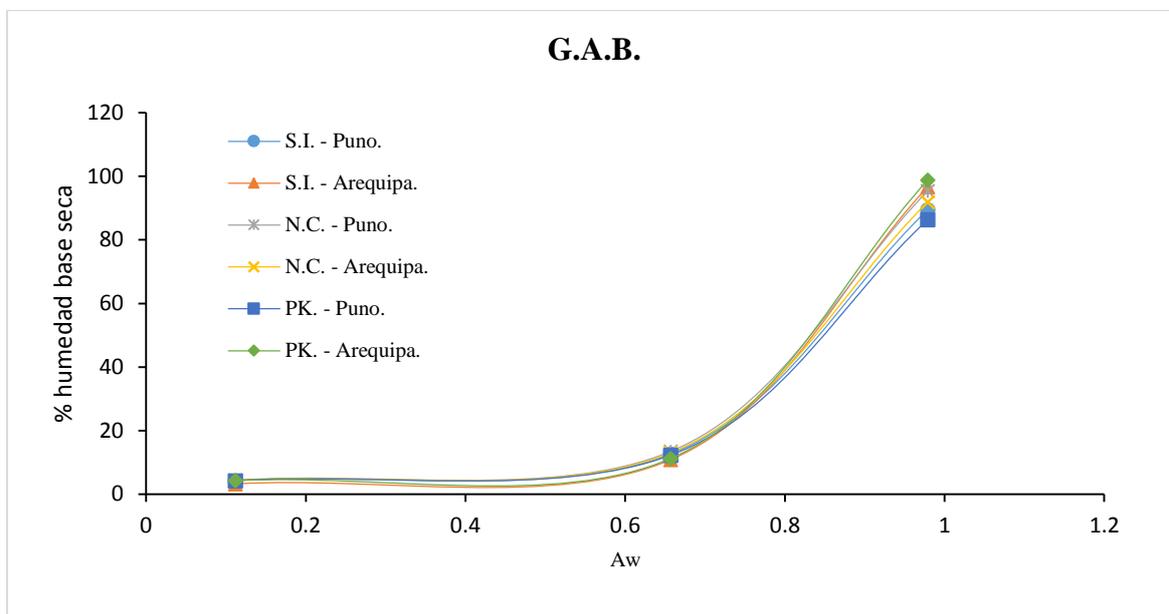
- Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch structure and digestibility Enzyme-Substrate relationship. *World's Poultry Science Journal*, 60, 186 - 195.
- Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters. *Journal of Food Engineering*, 48(1), 19 - 31.
- Tolaba, M. P., Peltzer, M., Enriquez, N., & Pollio, M. L. (2004). Grain sorption equilibria of quinoa grains. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 365 - 371.
- Tóth, J. (2002). *Adsorption: Theory, Modeling, and Analysis*. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Tsami, E. (1991). Net isosteric heat of sorption in dried fruits. *Journal of Food Engineering*, 14(4), 327 - 335.
- USDA/ARS. 2014. United States Department of Agriculture/Agricultural Research Service. National Nutrient Database for Standard Reference, Release 27, Software v.2.2.3. Nutrient. Data Laboratory. <http://ndb.nal.usda.gov/>.
- Van den Berg, C. (1985). Development of B.E.T.-Like Models for Sorption of Water on Foods, Theory and Relevance. *Properties of Water in Foods*, 119–131.
- Van der Zanden, A. J. J., & Goossens, E. L. J. (2004). The measurement of the sorption isotherm of water in paint films. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(6), 739 - 743.
- Varriano-Marston, E., & Defrancisco, A. (1984). Journal of Food Structure Ultrastructure of Quinoa Fruit (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Food Structure*, 3(3), 165 - 173.
- Vega-Gálvez, A., Dagnino-Subiabre, A., Terreros, G., López, J., Miranda, M., & Di Scala, K. (2011). Mathematical modeling of convective air drying of quinoa-supplemented feed for laboratory rats. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 54(1), 161 - 171.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Mart, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain : a review. *J Sci Food Agric*, 90, 2541 - 2547.
- Vilche, C., Gely, M., & Santalla, E. (2003). Physical properties of quinoa seeds. *Biosystems Engineering*, 86(1), 59 - 65.
- Villa Vélez, H. A., Ferreira de Souza, S. J., Pumacaua Ramos, A., Polachini, T., & Telis-Romero, J. (2015). Thermodynamic properties of water adsorption from orange peels. *Journal Bioenergy and Food Science*, 02(2), 72 - 81.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1991). Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *Journal of Food Engineering*, 14(4), 269 - 287.

- Wolf, W., Spiess, W. E. L., & Jung, G. (1985). Standardization of isotherm measurements (Cost-Project 90 and 90 BIS). *Properties of Water in Foods*, 90, 661 - 679.
- Wolter, A., Hager, A., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2013). In vitro starch digestibility and predicted glycaemic indexes of buckwheat , oat , quinoa , sorghum , teff and commercial gluten-free bread. *Journal of Cereal Science*, 1 - 6.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., & Oliveira, F. A. R. (2008). Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana. *Journal of Food Engineering*, 86(3), 342 - 348.
- Young, J. F. (2007). Humidity control in the laboratory using salt solutions-a review. *Journal of Applied Chemistry*, 17(9), 241 - 245.
- Zewdu, A. D. (2011). Moisture-dependent physical properties of ajwain (*Trachyspermum ammi* L.) seeds. *Philippine Agricultural Scientist*, 94(3), 278 - 284.

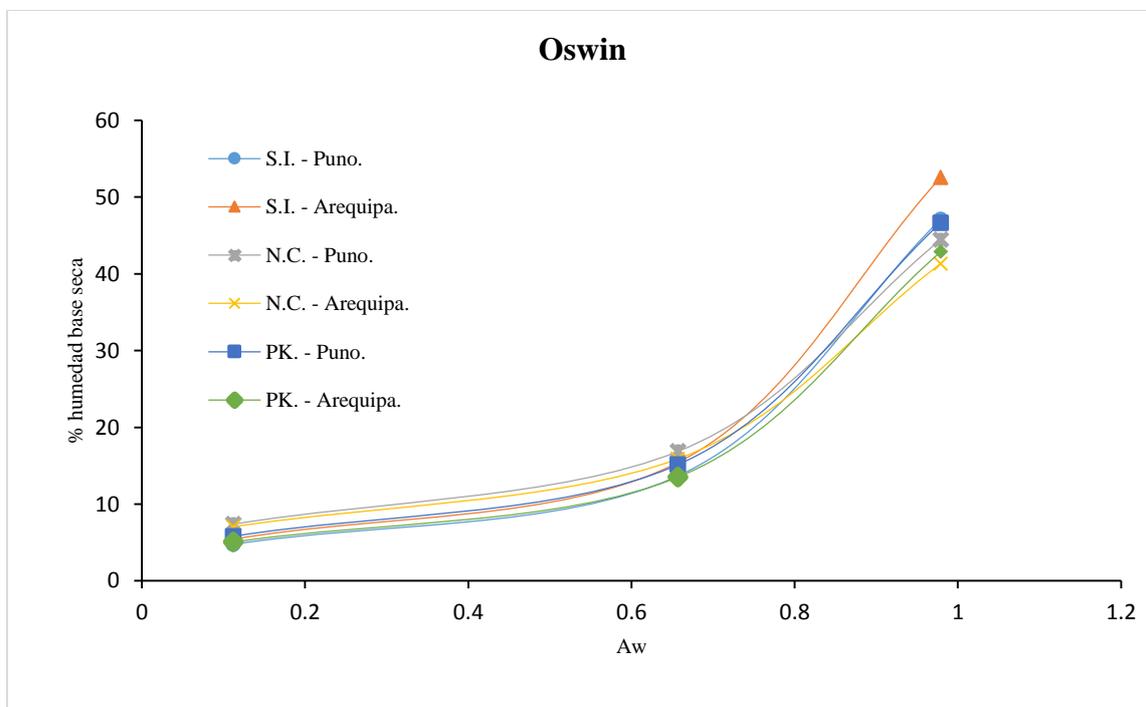
ANEXO

Anexo 1: curvas de isotermas de adsorción en seis modelos matemáticos de granos de quinuas de tres variedades cultivadas a diferentes altitudes.

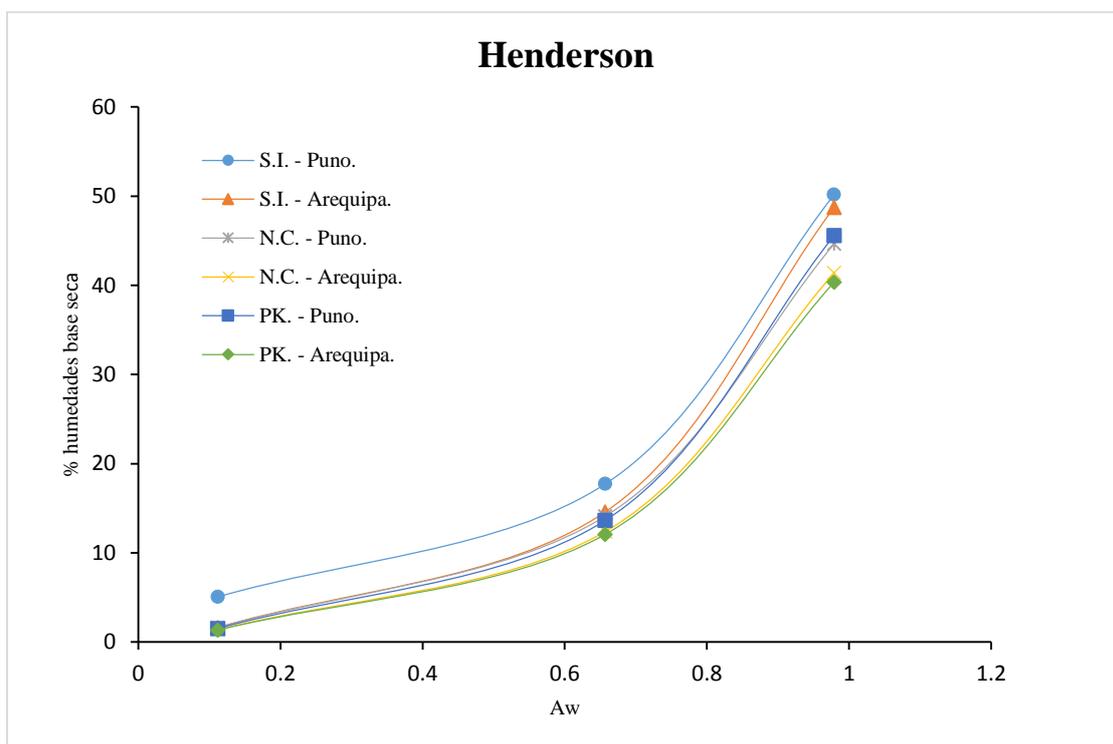
1.1. Modelo matemático G.A.B.



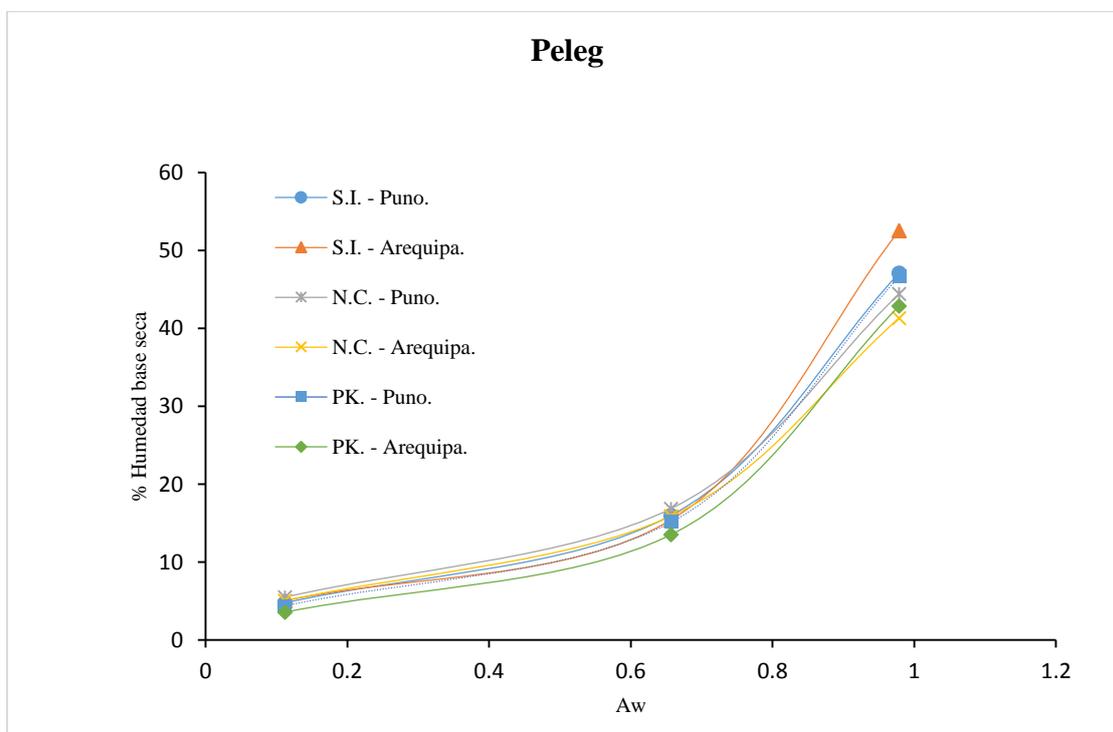
1.2. Modelo matemático Oswin.



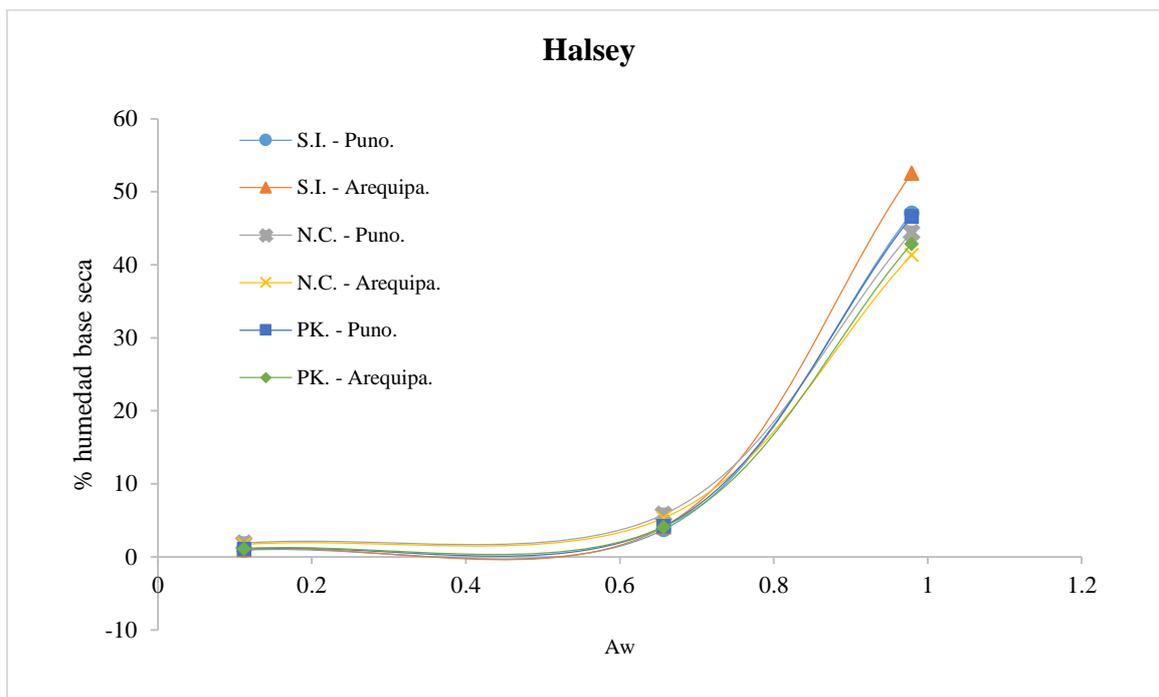
1.3. Modelo matemático Henderson.



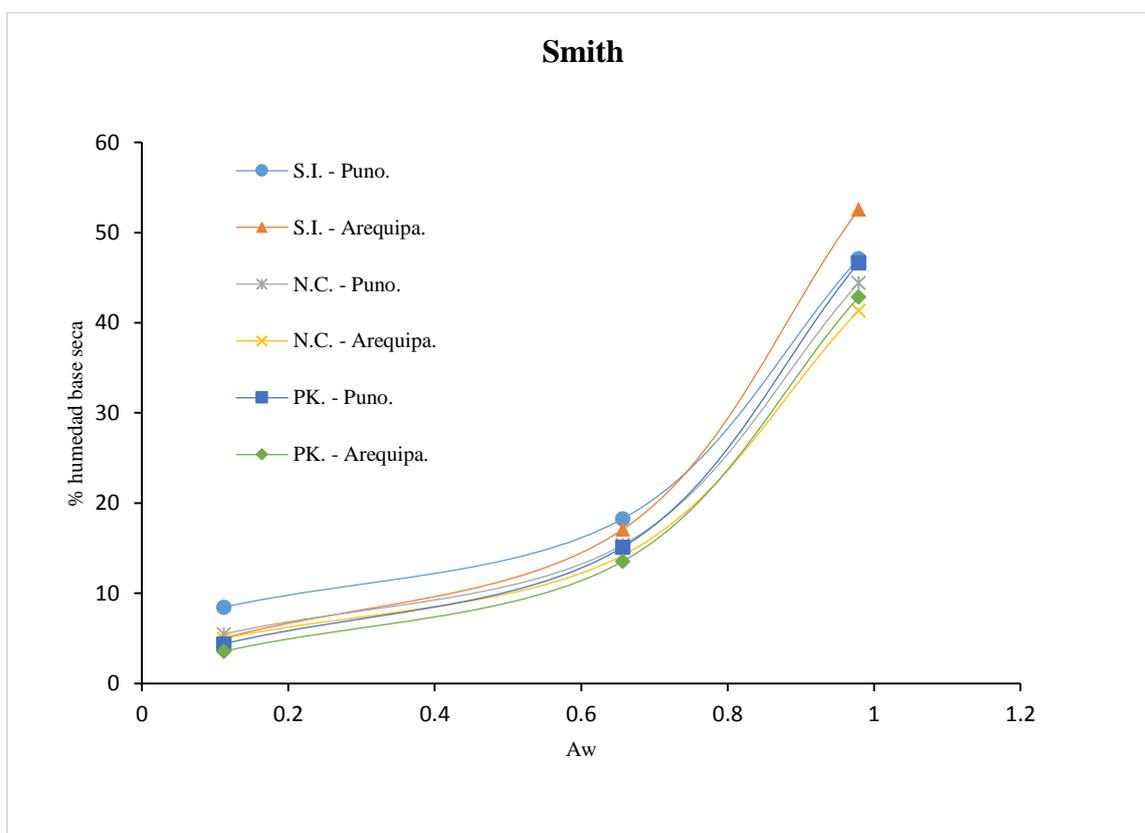
1.4. Modelo matemático Peleg.



1.5. Modelo matemático Halsey.



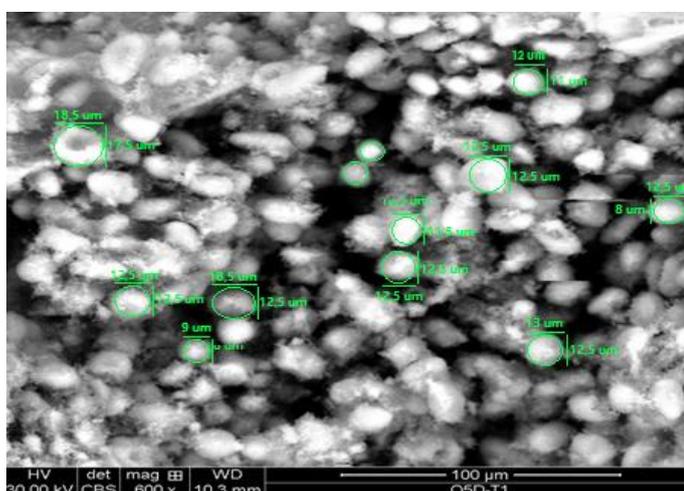
1.6. Modelo matemático Smith.



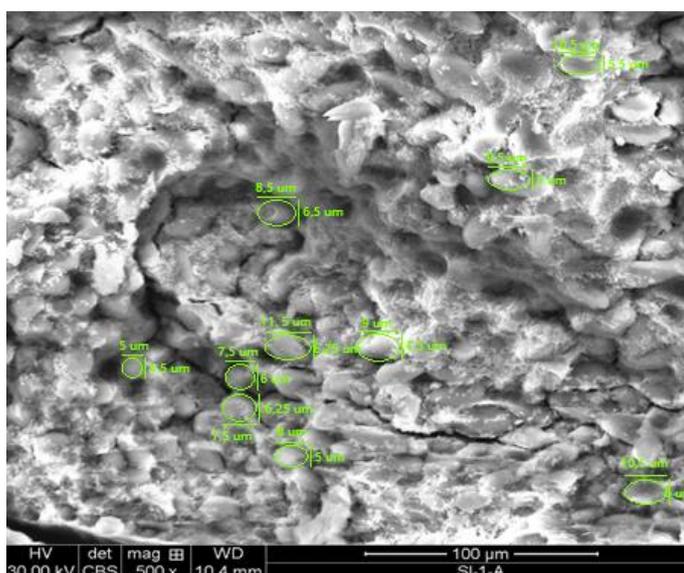
Anexo 2: Imágenes de microestructura de los granos de quinua a diferentes actividades de agua.

Anexo 2.1. Microestructura de la quinua de la variedad Salcedo INIA.

Aw=0,112		Aw=0.657		Aw=0.979	
Puno.	Arequipa.	Puno.	Arequipa.	Puno.	Arequipa.



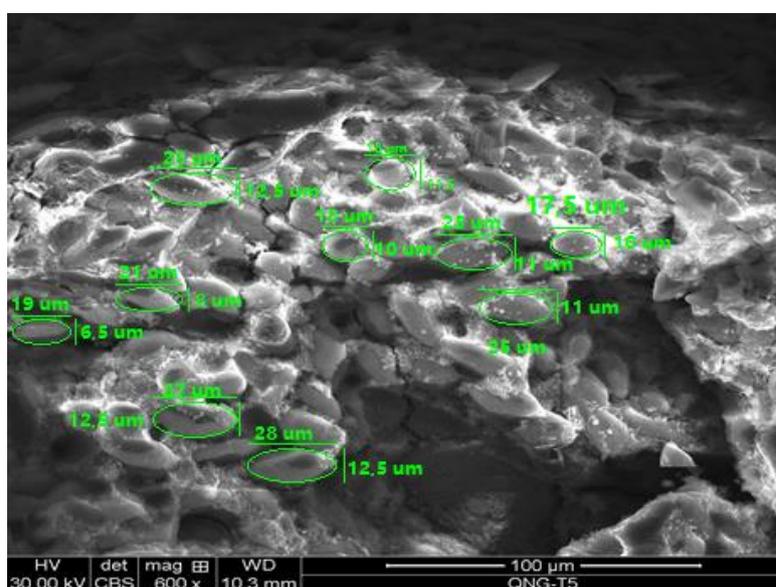
Cultivado en Puno.



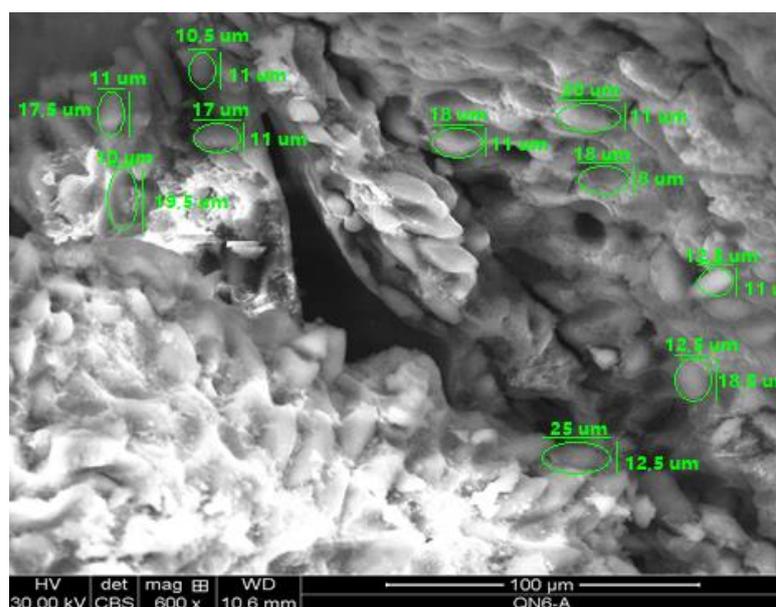
Cultivado en Arequipa

Anexo 2.2. Microestructura de la quinua de la variedad Negra Collana.

Aw=0,112		Aw=0.657		Aw=0.979	
Puno.	Arequipa.	Puno.	Arequipa.	Puno.	Arequipa.



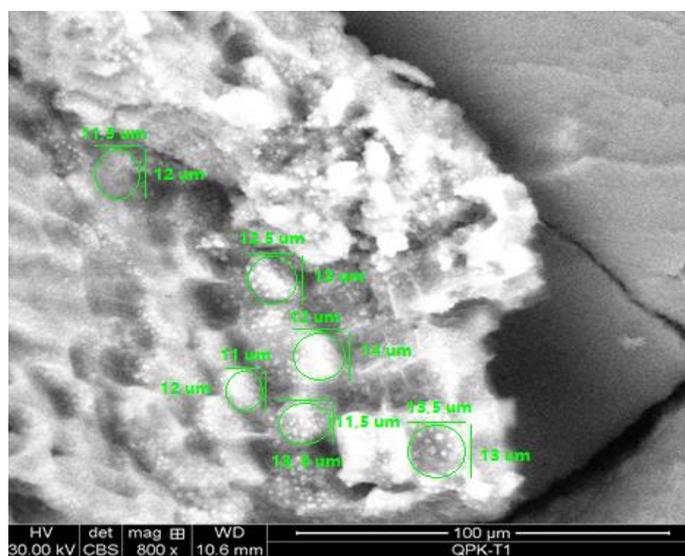
Cultivado en Puno.



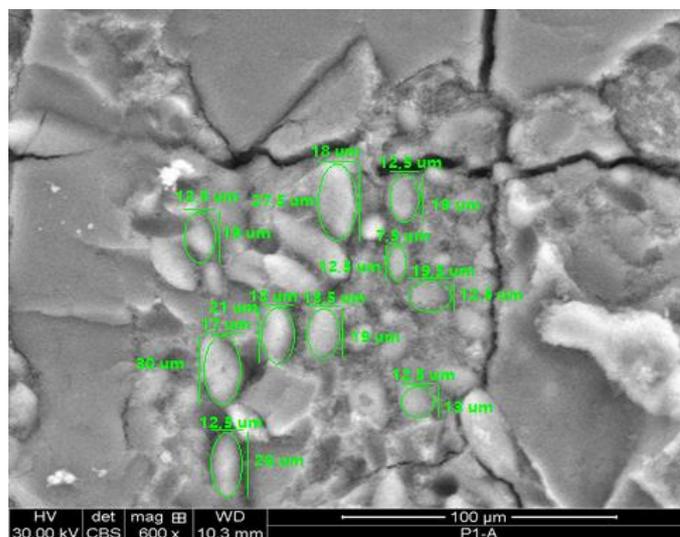
Cultivado en Arequipa.

Anexo 2.3. Microestructura de la quinua de la variedad Pasankalla.

Aw=0,112		Aw=0.657		Aw=0.979	
Puno.	Arequipa.	Puno.	Arequipa.	Puno.	Arequipa.



Cultivado en Puno.



Cultivado en Arequipa.

Anexo 3: Propiedades físicas de tres variedades de quinua

Cuadro 1: ANVA para el tamaño (mm) de las semillas de quinua de tres variedades cultivadas en dos altitudes.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2.47788	5	0.495576	20.63	0.0000
Intra grupos	4.42013	184	0.0240224		
Total (Corr.)	6.89801	189			

Cuadro 2: Prueba múltiple de rango DUNCAN con un nivel de confianza 95% para el tamaño de las semillas de quinua.

Variedades de quinua	Casos	Media	Grupos Homogéneos
NC - Arequipa	30	1.4098	X
NC - Puno	30	1.42542	X
SI - Arequipa	30	1.50493	X
SI-Puno	40	1.65484	X
PK - Arequipa	30	1.66526	X
PK - Puno	30	1.68596	X

Cuadro 3: ANVA para densidad (kg m^{-3}) de semillas de quinua de tres variedades cultivadas en dos altitudes.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2.47788	5	0.495576	20.63	0.0000
Intra grupos	4.42013	184	0.0240224		
Total (Corr.)	6.89801	189			

Cuadro 4: Prueba múltiple de rango DUNCAN con un nivel de confianza 95% para densidad de semillas de quinua.

Variedades de quinua	Casos	Media	Grupos Homogéneos
NC - Arequipa	30	1.4098	X
NC - Puno	30	1.42542	X
SI - Arequipa	30	1.50493	X
SI-Puno	40	1.65484	X
PK - Arequipa	30	1.66526	X
PK - Puno	30	1.68596	X

Cuadro 5: ANVA para el color *L (Luminosidad) de semillas de quinua de tres variedades cultivadas en dos altitudes.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2.47788	5	0.495576	20.63	0.0000
Intra grupos	4.42013	184	0.0240224		
Total (Corr.)	6.89801	189			

Cuadro 6: Prueba múltiple de rango DUNCAN con un nivel de confianza 95% *L (Luminosidad) de semillas de quinua de tres variedades cultivadas en dos altitudes.

Variedades de quinua	Casos	Media	Grupos Homogéneos
NC - Arequipa	30	1.4098	X
NC - Puno	30	1.42542	X
SI - Arequipa	30	1.50493	X
SI-Puno	40	1.65484	X
PK - Arequipa	30	1.66526	X
PK - Puno	30	1.68596	X

Cuadro 7: ANVA para el tamaño (μm) del almidón de la microestructura de la variedad Salcedo INIA, cultivada en la Región de Puno y Arequipa.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0508805	1	0.0508805	0.01	0.9409
Intra grupos	439.542	48	9.15712		
Total (Corr.)	439.593	49			

Cuadro 8: Prueba múltiple de rango DUNCAN con un nivel de confianza 95% para el tamaño de almidón de quinua en grano (Salcedo INIA) – Puno y Arequipa.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
S.I. - Arequipa	25	12.244	X
S.I. - Puno.	25	12.3078	X

Cuadro 9: ANVA para el tamaño (μm) del almidón de la microestructura de la variedad Negra Collana, cultivada en la Región de Puno y Arequipa.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	48.0376	1	48.0376	2.81	0.1001
Intra grupos	820.234	48	17.0882		
Total (Corr.)	868.271	49			

Cuadro 10: Prueba múltiple de rango DUNCAN con un nivel de confianza 95% para el tamaño de almidón de quinua en grano (Negra Collana) – Puno y Arequipa.

Procedencia	Casos	Media	Grupos Homogéneos
N.C. - Arequipa.	25	13.3567	X
N.C. - Puno.	25	15.317	X

Cuadro 11: ANVA para el tamaño (μm) del almidón de la microestructura de la variedad Pasankalla, cultivada en la Región de Puno y Arequipa.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	111.91	1	111.91	3.29	0.0761
Intra grupos	1633.87	48	34.0389		
Total (Corr.)	1745.78	49			

Cuadro 12: Prueba múltiple de rango DUNCAN con un nivel de confianza 95% para el tamaño de almidón de quinua en grano (Pasankalla) – Puno y Arequipa.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
PK.-Puno.	25	12.354	X
PK.- Arequipa.	25	15.3461	X

ANEXO 4: Muestras de variedades de quinua y sus respectivas certificaciones.



ANEXO 5

Panel fotográfico.

Isotermas de adsorción.



Determinación de propiedades físicas



Determinación de microestructura de la quinua.

