UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

ISOTERMAS DE SORCIÓN DE AGUA DE HARINA DE QUINUA: ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Tesis sustentada y aprobada el jueves 19 de diciembre de 2024, estando presentes los miembros del Jurado calificador y Asesor integrado por:

PRESIDENTE:

Dr. Nils Leander Huamán Castilla

PRIMERO MIEMBRO:

Dr. Erick Manuel Saldaña Villa

SEGUNDO MIEMBRO:

Mg. Lia Ethel Velásquez Castillo

ACCESITARIO:

Mg. Kyara Yuriko Huaccha Cabrera

ASESOR

Dr. Jhony Mayta Hancco

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación de la modalidad de titulación del bachiller:
RESOLUCIÓN DE FACULTAD Nº 165-2024-FACIA-UNAM

Fecha: 04/09/24

III. Documento de aprobación para la sustentación:
RESOLUCIÓN DE FACULTAD Nº 250-2024-FACIA-UNAM

Fecha: 17/12/24

IV. El Jurado ha dictaminado la (el) TESIS,

TITULADO: "ISOTERMAS DE SORCIÓN DE AGUA DE HARINA DE QUINUA: ANÁLISIS TERMODINÁMICO"

Bachiller: JORGE FERNANDO PANTIGOSO CANAHUIRE

Asesor Principal: Dr. JHONY MAYTA HANCCO

Co-Asesor: Dra. OLIVIA MAGALY LUQUE VILCA

V. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

Con nota: TRECE (13) por lo que; Sí [ ] No [ ]

Opta el Título Profesional de **INGENIERO AGROINDUSTRIAL**.

Siendo las 19:30 horas, del 19 de DICIEMBRE del año 2024 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente Nils Lohander Huaman Castilla (Nombres y Apellidos)	Primer Miembro Erick Manuel Saldaña Villa (Nombres y Apellidos)	Segundo Miembro LÍA ETHEL VELÁSQUEZ CASTILLO (Nombres y Apellidos)
Asesor Principal Jhony Mayta Hancco (Nombres y Apellidos)	Miembro Accesitario Kyara Yuriko Huaccha Cabrera (Nombres y Apellidos) Bachiller Jorge Fernando Pantigoso Canahuire (Nombres y Apellidos)	Co-Asesor (Nombres y Apellidos)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

TESIS:

ISOTERMAS DE SORCIÓN DE AGUA DE HARINA DE QUINUA: ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Presentando por:

Bach. Jorge Fernando Pantigoso Canahuire

Asesor:

Jhony Mayta Hancco

Coasesor:

Dra. Olivia Magali Luque Vilca

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Moquegua, Perú

2024

DEDICATORIA

A mis padres Constantino y Asunta,
por su trabajo y sacrificio
A mis hermanos Yudy, Patricia y Percy,
por su apoyo constante
A mi esposa Ana Huaje,
por su comprensión y amor
A mis hijos Vinchenzo y Anna,
por ser mi mayor motivación y
fuente de alegría

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi Asesor de tesis, Dr. Jhony Mayta Hancco, y a mi Coasesor, Dra. Olivia Magaly Luque Vilca, por su valiosa guía, paciencia y sabios consejos a lo largo de todo el proceso de investigación. Asimismo, extiendo mi agradecimiento a mis mentores y a los miembros del jurado de tesis, cuyo apoyo y críticas constructivas contribuyeron significativamente a enriquecer esta investigación.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y organizaciones que me brindaron su apoyo a lo largo del desarrollo de esta tesis. En particular, deseo agradecer profundamente al Ing. Ciro Suca Colana, a la Ing. Raquel Allison Choquehuanca Pineda, a la Lic. Carola Inés Pichilingue Díaz y al Dr. Daniel Alberto García Rodríguez, por su invaluable orientación, paciencia y apoyo constante durante todo este proceso.

De igual manera, extiendo mi más sincero agradecimiento a Incuba UNAM y a Desarrollo Comunitario Toquepala de Southern Peru, cuyas palabras de aliento, así como su compromiso con el apoyo a los emprendedores del sur, fueron una fuente constante de motivación que me impulsó a seguir adelante en los momentos más desafiantes de esta investigación.

Finalmente, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a los Laboratorios de Procesos Alimentarios de la Universidad Nacional de Juliaca por su valiosa colaboración, la cual fue fundamental para la culminación de esta investigación

Glosario de términos

° C	:	Grados centígrados
%	:	Porcentaje
a_w	:	Actividad de Agua
PK	:	Variedad de quinua Pasankalla
b.s.	:	Base seca
MRE%	:	Error medio relativo%
RD	:	Distribución residual
SEE	:	Error estándar
R^2	:	Coeficiente de determinación
Q_s	:	Calor isostérico de sorción o entalpia diferencial
ΔS	:	entropía de sorción
H_L	:	Entalpía de vaporización de agua (kJ/kg)
T_{hm}	:	Temperatura media harmónica (K)
T_β	:	Temperatura isocinética (K)
ΔG	:	Energía libre de Gibbs (kJ/kg)
X_e	:	Contenido de humedad en equilibrio (% b.s.)
VSA	:	Analizador de sorción de vapor
FTIR	:	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier
µm	:	Micrómetro

Resumen

La presente investigación tuvo por objetivo evaluar el comportamiento de isotermas de adsorción de agua y sus propiedades termodinámicas en harina de quinua de la variedad INIA–415 Pasankalla en dos tamaños de partícula a diferentes temperaturas (20, 30 y 40 ºC) y actividad de agua (0.1 – 0.9), así como la evaluación de color, actividad de agua, y grupos funcionales. Las isotermas de sorción fueron construidas por el método de punto de rocío mediante un analizador de sorción de vapor (VSA). Los datos del contenido de humedad en equilibrio fueron ajustados a 10 modelos matemáticos. El color fue determinado mediante un colorímetro en el espacio de color L, a y b. La actividad de agua se determinó por el método de punto de rocío mediante un Pre Aqualab. Los grupos funcionales fueron hallados mediante el espectroscopio infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR). Las isotermas de adsorción fueron clasificados tipo II por mostrar una forma sigmoidal. El análisis de color mostró una mayor coloración rojiza (5.03 en a*) en harina gruesa (# 60) y una tonalidad amarillenta (13.27 en b*) en harina más fina (# 200). La actividad de agua encontrada fue 0.361 y 0.333 en harina gruesa y fina respectivamente. EL modelo modificado de Smith fue el que mejor se ajustó al comportamiento de adsorción de harina de quinua gruesa (MRE% 1.63) y fina (MRE% 1.76). El análisis termodinámico que los valores de calor isostérico (Qs) de harina gruesa (12711.96 kJ/kg) y fina (8586.34 kJ/kg) disminuyeron a valores cercarnos al calor latente de vaporización de agua (2400 kJ/kg), así mismo, los valores de la entropía (ΔS) decrecieron con el incremento de la humedad; la energía libre de Gibbs (ΔG) mostró una disminución de sus valores con el incremento del contenido de humedad y temperatura. La teoría de compensación entalpía-entropía fue confirmada en ambos tamaños de harina de quinua, por la fuerte correlación entre la entalpía y entropía, así como, la diferencia encontrada entre T_B y T_{hm}; se determinó que el proceso de adsorción fue un proceso ordenado (controlado por la entalpía). El análisis espectroscópico infrarrojo mostró mostro la presencia de almidón, ácidos carboxílicos y proteínas, ya que se encontraron picos entre los rangos 2800-2900 cm□¹, 1750-1730 cm□¹, 1630-1540 cm□¹ y 1220-1270 cm□¹ en ambos tamaños de harina de quinua.

Palabras clave: Harina de quinua, isotermas de sorción, actividad de agua granulometría, propiedades termodinámicas.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the behavior of water adsorption isotherms and their thermodynamic properties in quinoa flour of the INIA-415 Pasankalla variety, with two particle sizes and varying temperatures (20, 30, and 40°C) and water activities (0.1–0.9), as well as to assess color, water activity, and functional groups. The adsorption isotherms were constructed using the dew point method with a vapor sorption analyzer (VSA). The equilibrium moisture content data were fitted to 10 mathematical models. Color was determined in the L, a, and b color space using a colorimeter. Water activity was measured using the dew point method with a Pre Aqualab. Functional groups were identified using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The adsorption isotherms were classified as type II, showing a sigmoidal shape. Color analysis revealed a reddish hue (5.03 at a*) in coarse flour (No # 60) and a yellowish tint (13.27 at b*) in finer flour (No # 200). Water activity levels were found to be 0.361 and 0.333 in coarse and fine flour, respectively. The modified Smith model provided the best fit to the adsorption behavior of both coarse (MRE % 1.63) and fine (MRE % 1.76) quinoa flour. Thermodynamic analysis revealed that the isosteric heat (Qs) values for coarse (12,711.96 kJ/kg) and fine (8,586.34 kJ/kg) flour decreased, approaching the latent heat of vaporization of water (2,400 kJ/kg). Additionally, entropy (ΔS) values decreased with increasing moisture content, and Gibbs free energy (ΔG) values decreased as moisture content and temperature increased. The enthalpy-entropy compensation theory was confirmed for both quinoa flour sizes, showing a strong correlation between enthalpy and entropy, as well as a difference between the desorption and humification temperatures (T_B and T_{hm})

Keywords: Quinoa flour, sorption isotherms, water activity, granulometry, thermodynamic properties.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 10

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 11

1.1. Descripción y Formulación del Problema 11
1.2. Objetivos 12
1.2.1. Objetivo general 12
1.2.2. Objetivos Específicos 12
1.3. Justificación e importancia 13
1.4. Hipótesis 14
1.4.1. Hipótesis General 14
1.4.2. Hipótesis Específicas 14
1.5. Variables 15

II. MARCO TEÓRICO 16

2.1. Antecedentes 16
2.2. Bases Teóricas 18
2.2.1. Quinua 18
2.2.2. Harina de quinua 19
2.2.3. Factores que influyen en la Calidad de la Harina de Quinua 21
2.2.4. Isotermas de sorción 23
2.2.5. Modelos Matemáticos de isotermas de sorción 28
2.2.6. Propiedades Termodinámicas 36
2.2.7. Espectrofotometría Infrarroja por transformadas de Fourier. 37
2.3. Definición de términos 38

III. METODOLOGÍA 40

3.1. Tipo y nivel de investigación 40
3.2. Ámbito temporal y espacial 40
3.3. Población y muestra 40
3.3.1. Clasificación Granulométrica de la muestra 41
3.4. Instrumentos 41
3.4.1. Equipos 41
3.4.2. Materiales 42
3.4.3. Insumos y reactivos 42

3.5. Procedimientos 42
3.5.1. Determinación del Color 42
3.5.2. Determinación de la humedad. 43
3.5.3. Determinación de Actividad de Agua 44
3.5.4. Determinación de las Isotermas de sorción 44
3.5.5. Modelamiento matemático 44
3.5.6. Determinación de las Propiedades Termodinámicas 45
3.5.7. Análisis de Espectrofotometría Infrarroja 46
3.6. Análisis de datos 47
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES 48
4.1. Granulometría de la harina de quinua 48
4.2. Análisis de Color 48
4.3. Análisis de Humedad y actividad de agua 50
4.4. Obtención de las Isotermas de sorción 52
4.5. Modelamiento matemático 54
4.6. Propiedades termodinámicas 55
4.6.1. Entalpía de sorción 55
4.6.2. Entropía de sorción 56
4.6.3. Energía libre de Gibbs 57
4.6.4. Teoría de compensación entalpía-entropía 58
4.7. Espectrofotometría Infrarroja por transformadas de Fourier. 59
V. CONCLUSIONES 61
VI. RECOMENDACIONES 62
VII. REFERENCIAS 63
VIII. ANEXOS 73

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables Independientes..... 15
Tabla 2 Operacionalización de variables Dependientes..... 15
Tabla 3 Tabla de las propiedades nutritivas y beneficios de la quinua..... 19
Tabla 4 Composición química de la harina de quinua..... 21
Tabla 5 Clasificación granulométrica de la harina de quinua 48
Tabla 6 Parámetros de Color a diferente tamaño de partícula..... 49
Tabla 7 Contenido de humedad y actividad de agua de harina de quinua de la variedad Pasankalla..... 51
Tabla 8 Ajuste y coeficientes de modelos matemáticos para isotermas de sorción. 54
Tabla 9 Teoría de compensación entalpía-entropía (teoría isocinética) 59

Índice de Figuras

Figura 1 Serie histórica de la producción de quinua en el Perú..... 20
Figura 2 Tipo de isotermas de sorción según forma y proceso..... 24
Figura 3 Isotermas de sorción de harina de quinua tamaño # 60 (a) y tamaño 200 (b)..... 52
Figura 4 Entalpía de sorción de humedad de harina de quinua tamaño N# 60 (a) y N# 200 (b)..... 56
Figura 5 Entropía de sorción de harina de quinua, tamaño N# 60 y N# 200..... 57
Figura 6 Cambios de la energía libre de Gibbs en el proceso de adsorción de harina de quinua tamaño N# 60 (a) y N# 200 (b) 58
Figura 7 La relación lineal entre la entalpía y entropía de sorción de harina de quinua con tamaño N# 60 (a) y N# 200 (b) 58
Figura 8 Análisis vibracional (FTIR) de harina de quinua de la variedad Pasankalla (PK) tamaño N# 60 (a) y N# 200 (b) 60

INTRODUCCIÓN

La harina de quinua ha despertado un creciente interés en la industria alimentaria debido a sus propiedades nutricionales y funcionales. Como fuente de compuestos bioactivos, tales como péptidos, polisacáridos y polifenoles, la quinua se destaca no solo por su valor nutritivo, sino también por su potencial en aplicaciones antioxidantes, antidiabéticas y antimicrobianas (G. Ren et al., 2023; Tan et al., 2021). En estudios recientes, se ha identificado que las fracciones de polisacáridos obtenidas de la quinua contienen hasta un 45,31% de azúcares totales, con una estructura principalmente heteropolisacárida (Tan et al., 2021). Sin embargo, la estabilidad y conservación de la harina de quinua dependen en gran medida de su interacción con el agua, factor que afecta su calidad, almacenamiento y aplicabilidad en productos industriales. En este contexto, el estudio de las isotermas de sorción de agua es fundamental para optimizar su almacenamiento y procesamiento, garantizando la estabilidad del producto a través del control de la actividad de agua (Tapia et al., 2020).

El análisis termodinámico de las isotermas de sorción en alimentos proporciona información clave para entender la relación entre el contenido de humedad y la actividad de agua, permitiendo predecir la estabilidad y vida útil del producto (Kyzas & Lazaridis, 2020). En el caso de la harina de quinua, este conocimiento es esencial para mejorar su resistencia a degradaciones, como el crecimiento microbiano o la pérdida de propiedades sensoriales. Por ejemplo, en harinas similares, como la de yuca, se ha demostrado que la humedad de equilibrio no debe superar el 9,34% a 27 °C para asegurar la estabilidad microbiológica durante el almacenamiento (Hawa et al., 2020). La caracterización precisa de estos fenómenos permitirá optimizar su utilización en la industria alimentaria, asegurando productos de alta calidad y durabilidad.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y Formulación del Problema

A pesar del creciente interés en la harina de quinua debido a sus propiedades nutricionales, la literatura científica ha concentrado mayormente sus esfuerzos en estudiar las características de sorción del grano entero de quinua. Este estudio se distingue por abordar las propiedades de sorción de la harina de quinua desde una perspectiva termodinámica. En investigaciones anteriores, se ha determinado el contenido de humedad de equilibrio de los granos de quinua mediante métodos gravimétricos estáticos, aplicando diferentes modelos de sorción para describir la relación entre la actividad del agua y el contenido de humedad de equilibrio. Entre los modelos utilizados, se han destacado el Brunauer–Emmett–Teller y el de Henderson, mostrando que el contenido de humedad monomolecular oscila entre el 3.72% y el 5.25% (Arslan, 2021). Además, se ha observado que el incremento del contenido de humedad provoca una disminución en el calor isostérico de sorción, así como cambios en la energía libre de Gibbs. Este vacío en la investigación sobre la harina de quinua resalta la necesidad de un análisis más profundo para comprender sus propiedades de sorción.

Esta investigación se enfoca en estudiar el comportamiento de sorción de agua de harina de quinua de la variedad INIA - 415 Pasankalla, prestando especial atención al fenómeno de sorción y a la determinación de propiedades termodinámicas. Por ejemplo, Bustos et al. (2020) utilizaron un enfoque gravimétrico estático para medir el contenido de humedad de equilibrio bajo diferentes condiciones de temperatura (15, 25, 35 y 50 °C) y niveles de humedad relativa que oscilaban entre el 11 % y el 96 %. Los resultados obtenidos se ajustaron a varios modelos matemáticos, destacándose el modelo Modificado de Halsey como el más adecuado para describir los fenómenos de sorción en las semillas. Se evidenció que el contenido de humedad en equilibrio es directamente proporcional a la actividad del agua y disminuye con el aumento de la temperatura. Además, los fenómenos de sorción fueron más pronunciados en rangos de actividad del agua más bajos. La energía libre de Gibbs mostró una disminución correlativa tanto con el incremento de la temperatura como con el contenido de humedad, confirmando

la teoría de compensación entalpía-entropía y sugiriendo que el proceso de sorción está controlado principalmente por la entalpía.

En Perú, la falta de estudios específicos sobre la harina de quinua representa un desafío para su comercialización y conservación en la industria alimentaria. A medida que la demanda de productos saludables y sostenibles aumenta, es esencial entender cómo las propiedades higroscópicas de la harina de quinua afectan su calidad y estabilidad debido a factores ambientales como la humedad y temperatura, lo que genera riesgos tanto para los productores como para los consumidores. Por ello, es necesario la implementación de estudios que analicen isotermas de sorción de la harina de quinua, sino también sus propiedades termodinámicas, para establecer mejores prácticas de almacenamiento y conservación. Esto no solo beneficiaría a la industria alimentaria al aumentar la calidad y durabilidad del producto, sino que también contribuiría a satisfacer las expectativas de un mercado en busca de alimentos nutritivos y de calidad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de la harina de quinua (Chenopodium Quinoa) con diferentes tamaños de partícula, mediante el análisis de sus propiedades fisicoquímicas, como color, humedad, actividad de agua y Espectrofotometría Infrarroja.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis colorímetro y de actividad de agua en harina de quinua de la variedad INIA-415 Pasankalla con diferente granulometría.
- Evaluar los datos experimentales de la humedad de equilibrio de la harina de quinua en función de la actividad de agua, utilizando la técnica de punto de rocío a diferentes temperaturas (20, 30 y 40 °C).
- Evaluar diez modelos matemáticos (GAB modificado, Chung modificado, Henderson modificado, Smith modificado, Halsey modificado, Oswin modificado, Harking – Jura modificado, Copace, Sigma - Copace en su versión I y II).

- Evaluar las propiedades termodinámicas, como el calor isostérico de sorción, entropía de sorción, energía libre de Gibbs, y teoría de compensación entalpía-entropía, a partir del modelo matemático que mejor se ajuste a los datos experimentales.
- Identificar los grupos funcionales presentes en harinas de quinua con diferente granulometría utilizando espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier.

1.3. Justificación e importancia

La quinua (*Chenopodium quinoa*) es considerado como pseudocereal (Pathan y Siddiqui, 2022), puede ser procesada de diferentes formas para obtener productos, tales como, fideos, expandidos, papillas, galletas, hojuelas, harinas, entre otros (G. Ren et al., 2023). La proteína de la quinua tiene una composición balanceada de aminoácidos esenciales principalmente lisina y metionina que a menudo son comparadas con los aminoácidos de la caseína de la leche, su contenido de calcio (Ca) contribuye en un 10% del requerimiento (Chaudhary et al., 2023). Por otro lado, la harina de quinua contiene un equilibrio de proteínas y carbohidratos, ha sido recomendada como alimento básico en dietas altamente nutritivas y para personas con enfermedad celiaca por no contener gluten (Urbina et al., 2023).

El efecto del tamaño de partícula de la harina de quinua muestra una diferencia significativa debido a que el contenido de proteína de harina varía con el tamaño de las partículas que se creen que está asociado con los materiales de la pared celular (Mu et al., 2023), el color de la harina depende del tamaño de las partículas, porque este último afecta a la reflexión de la luz, haciendo que las partículas más gruesas parezcan más oscuras debido a sus sombras más grandes (Yi y Wang, 2021). La determinación de las propiedades termodinámicas de los alimentos durante el almacenamiento es importante para: (1) relacionar la concentración de agua de los alimentos con su presión parcial que es crucial para el análisis de los fenómenos de transporte de masa y calor; (2) obtener un producto estable con humedad óptima; (3) determinar la cantidad mínima de energía requerida para remover cierta cantidad de agua de los alimentos; (4) explicar

microestructura de los alimentos, como una interpretación teórica del fenómeno físico que ocurre en la interfaz agua-alimento (Guo et al., 2023).

Con el estudio de las isotermas de sorción de la harina de quinua, se describirá el estado de equilibrio termodinámico del agua, que son datos importantes para el diseño y optimización de los equipos de secado, para la predicción de la calidad, la estabilidad y la vida útil, calculando los cambios de humedad que pueden ocurrir durante el almacenamiento (Witczak y Gałkowska, 2021).

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis General

Las harinas de quinua con diferente tamaño de partícula presentarán un mejor ajuste a las isotermas de adsorción y una mayor correlación con sus propiedades termodinámicas, mostrando diferencias significativas en sus propiedades fisicoquímicas, como el color, humedad, actividad de agua y grupos funcionales.

1.4.2. Hipótesis Específicas

- Las harinas de quinua con diferente tamaño de partícula presentan variaciones significativas en el color y en la actividad de agua.

- La humedad de equilibrio de las harinas de quinua varía en función de la actividad de agua y la temperatura, mostrando comportamientos diferentes a 20, 30 y 40 °C.

- Las isotermas de sorción de agua en harinas de quinua pueden ser modeladas con precisión mediante el uso de diez modelos matemáticos (GAB modificado, Chung modificado, Henderson modificado, Smith modificado, Halsey modificado, Oswin modificado, Harking – Jura modificado, Copace, Sigma - Copace en su versión I y II).

- Las propiedades termodinámicas, incluyendo el calor isostérico de sorción y la energía libre de Gibbs, mostrarán la dependencia al cambio del contenido de humedad en equilibrio.

- Los grupos funcionales presentes en harinas de quinua con diferentes tamaños de partícula son identificados mediante el espectrofotómetro infrarrojo por transformadas de Fourier.

1.5. Variables

Tabla 1

Operacionalización de variables Independientes

Variable	Indicadores	Índice
Tamaño de Partícula de la Harina de Quinua	Clasificación de las harinas en fracciones: Tamiz 250 µm y Tamiz 75 µm.	(micrómetros: µm)

Tabla 2

Operacionalización de variables Dependientes

Variable	Indicadores	Índice
Isotermas de sorción	Contenido de humedad en equilibrio vs a_w	% base seca vs adimensional
Propiedades termodinámicas	Entalpía y entropía de sorción, energía libre de Gibbs y teoría de compensación entalpía – entropía	kJ/kg, kJ/kgK
Propiedades Fisicoquímicas	Color a_w Espectrofotometría infrarroja.	L, *b, *a, Escala de 0 – 1 Absorbancia / cm^{-1}

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Siqueira et al. (2024) determinaron las isotermas de sorción de vapor de agua para la harina de Cúrcuma longa en temperaturas de almacenamiento (5 – 40 °C) y secado (40 – 80 °C). A partir de estas isotermas, se evaluaron parámetros termodinámicos como el calor isostérico neto, la entalpía y entropía diferenciales, y la energía libre de Gibbs. Utilizando la ecuación de Clausius-Clapeyron, se determinó que el modelo GAB ofrecía el mejor ajuste (R^2 adj. ≥ 0.998, RMSE $\leq$ 0.0065), mostrando que el contenido de humedad de equilibrio disminuye con el aumento de temperatura. Todas las isotermas presentaron un comportamiento tipo II. Además, se observó que tanto el calor isostérico de sorción como la entalpía y entropía diferenciales disminuyeron conforme aumentaba la temperatura. La teoría de compensación entalpía-entropía fue validada, caracterizando el proceso como dependiente de la entalpía y no espontáneo. Esto proporciona datos clave para mejorar el control de calidad en la producción y almacenamiento de cúrcuma

Arocutipa y Delgado (2022) evaluó las isotermas de adsorción de harina de torta de castaña (Bertholletia excelsa, H.B.K.) a diferentes temperaturas (35°C, 45°C y 55°C) utilizando el método gravimétrico estático, en un rango de actividad de agua (aw) de 0.0979 a 0.8880. Los gráficos obtenidos mostraron un comportamiento similar a las isotermas tipo II. A medida que aumentaba la actividad de agua para una temperatura dada, la humedad de equilibrio (Xe) también aumentaba, lo que es característico de la mayoría de los alimentos agrícolas. Los datos experimentales se ajustaron a seis modelos matemáticos comunes en isotermas de alimentos (BET, GAB, Halsey, Oswin, Chung-Pfost y Henderson). Los modelos GAB y Oswin demostraron ser los más precisos para representar las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña.

Campos et al. (2022) investigaron la composición nutricional y los compuestos bioactivos de la quinua y sus hojas, así como los efectos de varios tratamientos térmicos y la germinación. La quinua, un pseudocereal libre de gluten, es rica en proteínas, aminoácidos esenciales, lípidos, fibra, vitaminas y minerales, siendo apta para personas con celiaquía. Las hojas contienen más proteínas que los granos y son ricas en minerales como calcio, hierro y zinc. La quinua negra tiene

mayor actividad antioxidante que la blanca. Tratamientos térmicos, como la cocción, reducen ciertos nutrientes, mientras que la extrusión y el tostado disminuyen las saponinas. La germinación mejora la biodisponibilidad de los nutrientes, aumentando su valor nutricional. Aunque se requiere más investigación, las hojas de quinua muestran un gran potencial como alimento funcional.

Alvarado et al. (2020) investigaron las isotermas de adsorción a 25 °C para tres variedades de quinua: INIA Salcedo (IS), Pasankalla Roja (PR) y Negra Collana (NC), tanto malteada como sin maltear. Se analizaron las isotermas mediante un analizador de actividad de agua y modelos matemáticos como GAB y Oswin, que presentaron un buen ajuste con un coeficiente de correlación superior a 0,98 y un porcentaje de error medio relativo menor al 10%. El modelo de GAB fue el más adecuado. Se estimó la vida útil de las harinas sin maltear: blanca 13,7 meses, negra 13,3 meses, y roja 30,1 meses. Para las harinas malteadas, la vida útil fue mayor: blanca 28,5 meses, negra 33,9 meses, y roja 51,8 meses, bajo condiciones de almacenamiento al 87% HR y 25 °C.

Pantoja et al. (2020) destacan la relevancia de las harinas de granos andinos, como la quinua (Chenopodium quinoa Willd.) y el tarwi (Lupinus mutabilis Sweet), como fuentes ricas en proteínas y carbohidratos, lo que subraya la necesidad de su caracterización. Los autores caracterizaron la harina de quinua y tarwi para evaluar su potencial en la industrialización. Los resultados mostraron que la harina de quinua presenta una composición química proximal con un 9.05% de proteínas, 10.48±0.12% de humedad, 2.44±0.05% de cenizas, 2.53±0.02% de grasa, 3.11±0.03% de fibra y 72.39% de carbohidratos, mientras que la harina de tarwi contiene un 49.04% de proteínas, 6.33±0.15% de humedad, 2.85±0.04% de cenizas, 27.32±0.25% de grasa, 2.94±0.05% de fibra y 11.52% de carbohidratos. Estos resultados evidencian que ambas harinas, con su alto contenido de proteínas y carbohidratos, pueden ser consideradas como materias primas potenciales para la elaboración de alimentos nutritivos

Dussán et al. (2019) determinaron las propiedades granulométricas, funcionales y de color de las harinas de quinua y chontaduro, proponiéndolas como sustitutos del trigo en alimentos. Aunque el contenido de humedad y el índice de solubilidad en agua (ISA) fueron similares en ambas harinas, el índice de absorción

de agua (IAA) y el poder de hinchamiento (PH) fueron significativamente mayores en la harina de chontaduro ($p<0,05$). El contenido de humedad fue 6,70±0,20% para el chontaduro y 6,66±0,40% para la quinua. En términos de color, la harina de quinua mostró mayor luminosidad (L=84,87±1,5*) frente a la harina de chontaduro (L=76,573±0,5*), favoreciendo una apariencia más clara. Sin embargo, las propiedades funcionales de la harina de chontaduro, como su capacidad de gelatinización, la hacen más adecuada para ciertos productos alimenticios, destacando su versatilidad en la industria.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Quinua

La quinua (*Chenopodium quinoa*) es una planta nativa de los Andes en América del Sur, conocida por sus semillas comestibles que se utilizan como un grano. Aunque se considera un cereal, en realidad es una semilla de la familia de las amarantáceas, que incluye también a la remolacha y la espinaca. La quinua destaca por su alto contenido de proteínas completas, fibra, vitaminas B y E, así como minerales como hierro, magnesio y fósforo. Además, es naturalmente libre de gluten, lo que la convierte en una opción ideal para personas con enfermedad celíaca o sensibilidad al gluten. Su adaptabilidad a condiciones difíciles, como altitudes elevadas y sequías, la hace una alternativa nutritiva y sostenible en la alimentación (Arslan, 2021).

La quinua destaca por su alto valor nutricional, siendo una excelente fuente de proteínas, lípidos e hidratos de carbono tal como se puede ver en la Tabla 3 Contiene alrededor de 74 g de carbohidratos por cada 100 g de peso seco, de los cuales el 50-60% es almidón, compuesto principalmente por amilopectina (80%) y amilosa (20%). Además, tiene un contenido promedio de azúcares libres de 6.2 g/100 g, fibra bruta de 5 g/100 g, y fibra soluble de 2.49 g/100 g. Su proteína varía entre 8-22 g/100 g, comparándose favorablemente con el trigo y la avena, pero superando a arroz, maíz y cebada. Los lípidos en la quinua oscilan entre 4.0-7.6 g/100 g, siendo más altos que en el maíz, pero menores que en la soya. Su contenido de humedad es bajo, alrededor del 6.03%. Mineralmente, la quinua sobresale por

su alto contenido de hierro (13.2 mg/100 g), magnesio (246.5 mg/100 g) y calcio, superando a muchos cereales en estos nutrientes (Campos Rodríguez et al., 2022).

Tabla 3

Tabla de las propiedades nutritivas y beneficios de la quinua

Valor Nutricional		
Análisis fisicoquímico (g/100g, de muestra)		
Humedad	(%)	8.44
Proteínas	(%)	16.19
Fibra	(%)	1.84
Cenizas	(%)	2.00
Grasa	(%)	5.20
ELN	(%)	66.33
Energía	(Kcal/100g)	372.09

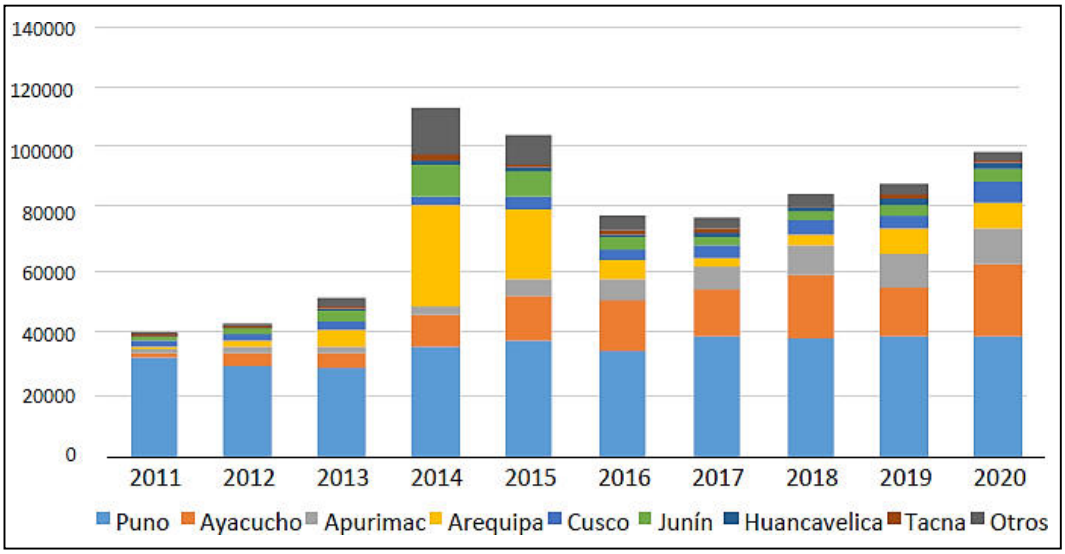
Nota. Análisis de Mercado 2015 – 2020 Quinua (p. 11) por (Contreras-Jimenez et al., 2019; MINAM, 2021)

2.2.2. Harina de quinua

En el Perú, la quinua se cultiva en 19 departamentos, en los años 2011 y 2020, ha región de Puno ha sido el principal productor de quinua tal como se puede ver en la **Figura 1**, seguido de Ayacucho. A partir del año 2016, las regiones de Apurímac y Arequipa fueron considerados como regiones con importante producción de quinua, mientras que la región Cuscoy Junín en menor medida. En el año 2011, la región Puno representaba cerca del 80% de la producción nacional, pero en el 2020 su se redujo en un 40%, (MIDAGRI., 2021)

Figura 1

Serie histórica de la producción de quinua en el Perú



Nota. Esta figura muestra la serie histórica de producción de quinua del 2011 al 2020 donde se ve una creciente producción de quinua y el mayor productor de quinua es el departamento de Puno. *Observatorio de las Siembras y Perspectivas de la Producción de Quinua (p. 06) por* MIDAGRI. (2021)

La harina de quinua es una fuente principal de proteínas y carbohidratos, y su valor nutricional y sensorial mejora notablemente respecto al grano de quinua, así como se observa sus principales componentes en la Tabla 4. Diversas investigaciones señalan cuán grande es el valor nutricional de la quinua e indican que es una fuente excelente de proteínas, lípidos e hidratos de carbono, además de contar con un amplio contenido de proteína y lípidos (Campos et al., 2022). La quinua es un alimento de alto nivel calórico, ya que posee un alto contenido de carbohidratos (74 g/100 g de peso seco), de los cuales el 50-60% es almidón, componiéndose de amilosa (20%) y amilopectina (80%) (Campos et al., 2022).

Tabla 4

Composición química de la harina de quinua

Componentes (%)	Harina de quinua
Humedad	10.48±0.12
Proteína	9.05
Cenizas	2.44±0.05
Grasa	2.53±0.02
Carbohidrato	72.39
Fibra	3.11±0.03

Nota. Resultado de la composición químico proximal porcentual de la harina de quinua *(p. 80) Caracterización de la harina de quinua (Pantoja et al., 2020)*

2.2.3. Factores que influyen en la Calidad de la Harina de Quinua

a) Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es una de las propiedades físicas más importantes y está directamente definido por su diámetro. Los tamaños de partícula se caracterizan como propiedades geométricas (Ambreen y Kim, 2020). El diámetro del tamiz es el más utilizado para caracterizar los tamaños de harina en el proceso de molienda, ya que corresponde a la longitud de la abertura cuadrada. Debido a que la harina no tiene un tamaño de partícula uniforme, es necesario medir una gran cantidad de partículas y producir una descripción de su distribución de tamaños, lo cual es esencial para el análisis de su manejo, procesamiento y funcionalidad (Y. Ren et al., 2021).

b) Color

El color es una propiedad física atribuida a la distribución espectral de luz, medible en términos de longitud de onda, espectro visible, e intensidad (Lin et al., 2024). El sistema desarrollado por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) tiene una fuente de iluminación y un observador estándar basados en la percepción del ojo humano: rojo, verde y azul, y tres parámetros: L* (luminosidad), a* (rojo a verde), y b* (amarillo a azul)

Los principales factores que afectan el color de las harinas y otras fracciones son pigmentos naturales como fenoles, antocianinas, taninos, carotenoides y xantofilas (Dussán et al., 2019). La evaluación del color de la harina y otros productos molidos es importante porque está relacionado con la eficiencia de molienda y la tasa de extracción, e influye en la calidad de los productos. La blancura de las harinas se ve afectada por el tipo de grano, la tasa de extracción de molienda, el envejecimiento de la harina y la extensión de oxidación de pigmentos carotenoides por compuestos blanqueadores (Arunima et al., 2021).

c) Actividad de agua

La actividad de agua (a_w) es un factor determinante en la calidad de la harina de quinua, ya que influye directamente en su estabilidad microbiológica, química y física. Se considera que una aw inferior a 0.6 previene el crecimiento de la mayoría de las bacterias, levaduras y mohos, asegurando una mayor vida útil del producto. En la harina de quinua, un rango de aw entre 0.30 y 0.50 es ideal para garantizar su estabilidad durante el almacenamiento, ya que minimiza la tasa de reacciones de deterioro, como la oxidación de lípidos o la hidrólisis de almidones (Rolandelli et al., 2022). Estudios han demostrado que una harina con aw cercana a 0.35 mantiene una buena textura y propiedades funcionales sin comprometer su seguridad microbiológica. Además, controlar la aw es esencial para evitar la formación de grumos o la pérdida de propiedades tecnológicas, como la capacidad de absorción de agua, que puede variar hasta en un 10% dependiendo de la aw. En resumen, mantener la aw dentro de rangos controlados no solo preserva la calidad sensorial y funcional de la harina de quinua, sino que también asegura su durabilidad en diversas aplicaciones industriales (Rolandelli et al., 2022).

d) Almacenamiento

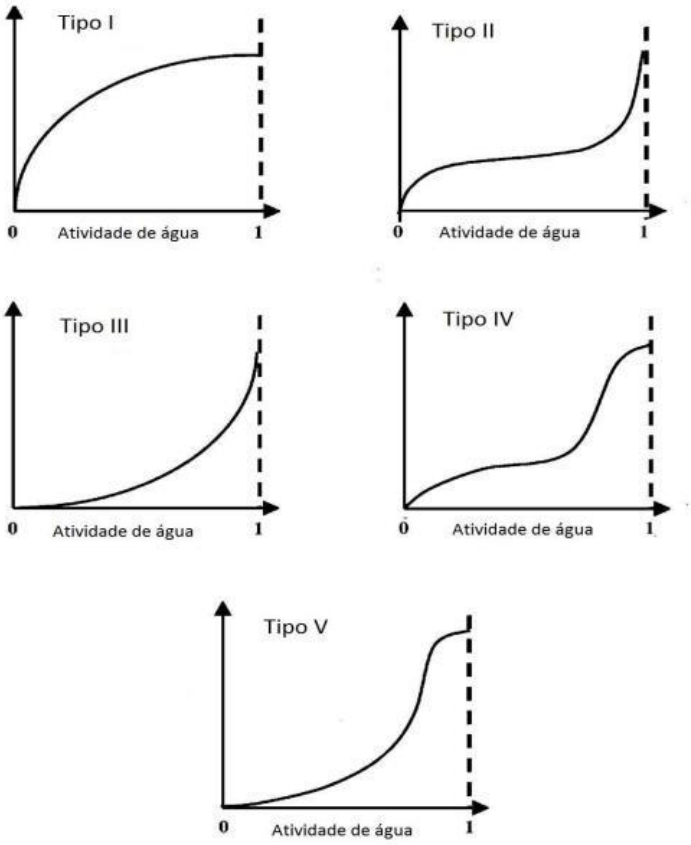
Usando las isotermas de sorción de humedad se seleccionan las condiciones de almacenamiento (temperatura, humedad relativa) resultando una mejora en la estabilidad como vida útil. Por ello, para mantener la calidad del producto en almacenamiento se debe mantener la humedad relativa circundante suficientemente baja para que la humedad del producto este por debajo del contenido crítico de humedad (Siqueira et al., 2024).

2.2.4. Isotermas de sorción

Las isotermas de sorción se clasifican en cinco tipos generales (**Figura 2**), basándose en la capacidad de los microporos del alimento, adsorber vapor de agua por medio de las fuerzas de Van der Waals (Acurio y Ciza, 2021). La isoterma de tipo I, también conocidacomo isoterma de Langmuir, su forma se atribuye a los adsorbentes microporosos debido al tamaño de los microporos del sólido. Al estar limitados a unas pocas capas moleculares, los poros superan ligeramente el diámetro molecular del adsorbente. Por otro lado, las formas de los tipos II y III (sigmoidal) proceden de adsorbentes en los que existe una amplia variación en el tamaño de los poros. Esta variación permite la adsorción de la monocapa a la multicapa, seguida de la condensación capilar, siendo el tipo II el más común. Harina de trigo, el almidón, el almidón modificado, entre otros, tienen isotermas de sorción de tipo II, cuya forma es sigmoidal. Las isotermas de tipo III se utilizan generalmente para representar las isotermas de sorción de alimentos que contienen mucha humedad y azúcar, como la fruta. Los tipos IV y V corresponden a isotermas de productos porosos, en los cuales la meseta de las curvas está asociada a la saturación capilar (Kyzas y Lazaridis, 2020).

Figura 2

Tipo de isotermas de sorción según forma y proceso



Nota. Imagen de la clasificación de acuerdo a la forma de diseño y proceso del trabajo de *investigación Isotermas de sorción en alimentos pulverulentos* Acurio y Ciza (2021)

a) Isotermas de sorción y la actividad de agua

La a_w comprendida entre 0.2 a 0.3 corresponde a la humedad de la monocapa, que representa la región óptima del contenido de humedad en la que los alimentos deshidratados tienen una vida útil máxima. Por encima o debajo de esta región, la tasa de oxidación de los lípidos aumenta, reduciendo la vida útil. La región de a_w entre 0.35-0.45, es donde empieza cambios en el estado físico como la pérdida de textura crujiente, pegajosidad de polvos y caramelos duros, seguida por una recristalización de azúcares en estado amorfo que provoca un apelmazamiento (compactación) irreversible. La región de a_w entre 0.4-0.5, en el que los materiales blandos como las pasas se endurecen al secarse, altamente relacionado con la transición vítrea. a_w de 0.6, es conocida como punto crítico, ya que existe la probabilidad del crecimiento microbiano si el contenido de humedad aumenta. La

región de a_w entre 0.6-0.8, corresponde a nivel máximo de reacciones de deterioro del alimento, sin embargo, a mayores contenidos de humedad disminuyen, ya que a un pequeño incremento de a_w significa un gran aumento el contenido de humedad. a_w de 0.85, también conocido también como punto crítico, ya que bacterias patógenas y de deterioro empiezan a crecer, siendo un riesgo alimentario y requiere que el alimento lleve diferentes procesos que permitan garantizar su inocuidad (Kyzas y Lazaridis, 2020).

b) Importancia de la obtención de isotermas de sorción

El conocimiento de los niveles de actividad de agua (a_w) de los alimentos, es un factor fundamental para el crecimiento microbiano, producción de toxinas, resistencia térmica de los microorganismos, y la estabilidad química de los alimentos. El conocimiento de la relación entre la a_w y el contenido de humedad de equilibrio de los materiales alimenticios es esencial para predecir los cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas que ocurren durante el almacenamiento y la transformación (Ramirez et al., 2014).

Asimismo, la temperatura desempeña un papel fundamental en la actividad del agua de los alimentos, dado que influye en la movilidad molecular del agua, así como el intercambio dinámico entre el vapor y el alimento. El incremento de la temperatura disminuye la energía de enlace entre moléculas, observando una reducción de la capacidad de adsorción de las moléculas de agua, lo que provoca cambios en la isoterma de sorción. Un incremento de la temperatura incrementa la actividad de agua a un mismo contenido de humedad en equilibrio, reflejando una reducción del número de sitios activos para la adsorción de agua como resultado de los cambios físico y/o químicos debido al aumento de la temperatura (Nazreen et al., 2020).

c) Métodos de determinación de isotermas de sorción

Las isotermas de sorción de agua son herramientas fundamentales en el estudio de la estabilidad de productos alimenticios. Estas curvas muestran la relación entre la actividad de agua y la humedad de equilibrio a una temperatura constante. Existen diversos métodos para determinar estas isotermas, cada uno con

ventajas y limitaciones según el tipo de material y las condiciones experimentales (Peleg, 2020).

El método estático es uno de los enfoques más comunes para determinar isotermas de sorción. Consiste en exponer las muestras de harina de quinua a diferentes niveles de humedad relativa (HR), que se mantienen constantes mediante el uso de soluciones salinas saturadas. Estas soluciones generan un ambiente con actividades de agua (aw) específicas que oscilan entre 0.1 y 0.9 dependiendo de la solución utilizada (por ejemplo, cloruro de litio, cloruro de sodio, etc.). Las muestras se mantienen en cámaras cerradas a temperatura controlada hasta que la humedad en la harina alcanza el equilibrio, lo cual se detecta cuando el peso de la muestra no varía significativamente durante varios días consecutivos (Labuza y Altunakar, 2020). Para llevar a cabo el proceso de equilibración de muestras, se requieren equipos como cámaras de desecación, balanzas de alta precisión, soluciones salinas y termohigrómetros. Es fundamental mantener una temperatura constante, ya que la actividad de agua y la capacidad de absorción de las harinas varían con ella; por lo tanto, se recomiendan cámaras termostatizadas. El tiempo de equilibración puede oscilar entre días y semanas, dependiendo del tipo de muestra, la granulometría y el nivel de humedad relativa, siendo las harinas más finas las que logran el equilibrio más rápidamente debido a su mayor área superficial. Sin embargo, este método presenta desventajas, como su relativa lentitud, el riesgo de contaminación ambiental y la posible degradación de las muestras durante el tiempo de exposición (Labuza & Altunakar, 2020).

El método dinámico es una técnica más sofisticada que utiliza un flujo continuo de aire a una humedad y temperatura controladas, generando cambios rápidos en las condiciones a las que la muestra está expuesta. El aire pasa sobre las muestras, y la humedad relativa del aire se ajusta utilizando controladores automáticos. Las muestras de harina se pesan en intervalos regulares hasta que el cambio de masa es mínimo, lo que indica que la harina ha alcanzado la humedad de equilibrio (Fiona et al., 2022). Para garantizar un proceso efectivo, es necesario mantener un flujo de aire constante y homogéneo que asegure una humedad relativa uniforme alrededor de la muestra. La medición continua se facilita mediante balanzas conectadas a sistemas automáticos que registran el peso en tiempo real,

minimizando el error humano y permitiendo un monitoreo constante (Fiona et al., 2022). Los sistemas modernos permiten un control preciso de la temperatura y la humedad relativa, ajustando esta última desde niveles tan bajos como el 5% hasta el 95%. Además, la velocidad del proceso se optimiza, ya que la variabilidad en la humedad del aire permite alcanzar el equilibrio en un tiempo considerablemente menor que en métodos estáticos, con reducciones de hasta un 50% en los tiempos de equilibración según estudios previos (Fiona et al., 2022).

El método del punto de rocío es uno de los más precisos para medir la actividad de agua. Este método determina el punto en el que el vapor de agua se condensa en la superficie de la muestra al enfriarse el aire circundante. La temperatura de condensación (o punto de rocío) está directamente relacionada con la actividad de agua del producto. Se usa un higrómetro de punto de rocío que mide la temperatura del aire a la cual se empieza a formar condensación (Noguera y Rivero, 2021). Para medir la actividad de agua en harinas que deben mantenerse secas, se requieren equipos como higrómetros de punto de rocío de alta precisión y controladores de temperatura y humedad. El proceso de medición implica enfriar gradualmente el aire que circula sobre la muestra hasta que se forma condensación, momento en el cual la temperatura registrada corresponde al punto de rocío, permitiendo calcular la actividad de agua. Este método destaca por su alta precisión, siendo especialmente útil para detectar niveles muy bajos de actividad de agua (Noguera y Rivero, 2021). Sin embargo, es fundamental realizar las mediciones a temperaturas controladas, como 20 °C, 30 °C y 40 °C, ya que la temperatura influye tanto en el punto de rocío como en la actividad de agua, lo que permite obtener un rango completo de isotermas.

Método de Isotermas Inversas que diferencia de los métodos anteriores, las isotermas inversas se centran en estudiar la desorción de agua, es decir, el proceso de pérdida de humedad de la harina en condiciones controladas. En este método, la muestra se seca inicialmente (por ejemplo, en un desecador) y luego se expone a diferentes niveles de humedad relativa, permitiendo que adsorba agua hasta alcanzar un nuevo equilibrio. La cantidad de agua adsorbida se mide en función del tiempo (Kyzas y Lazaridis, 2020). El proceso de desorción comienza con una muestra seca, que reabsorbe agua al ser expuesta a ambientes húmedos, lo que

resulta útil para estudiar la estabilidad del material durante su almacenamiento en condiciones secas. Este método tiene aplicaciones prácticas en la evaluación de la durabilidad y las propiedades de retención de humedad de productos como la harina de quinua, que son sensibles a la humedad elevada durante el almacenamiento (Zhang et al., 2022).

2.2.5. Modelos Matemáticos de isotermas de sorción

Los modelos matemáticos de isotermas de sorción son herramientas fundamentales para describir la relación entre el contenido de humedad de equilibrio de un material y la actividad de agua (aw) a diferentes temperaturas. Estos modelos no solo facilitan la comprensión del comportamiento de absorción y desorción de agua, sino que también permiten predecir la estabilidad del producto en distintas condiciones de almacenamiento. A continuación, se presentan los principales modelos matemáticos utilizados en la caracterización de isotermas de sorción, sus fundamentos teóricos, y su aplicabilidad en productos como la harina de quinua (Rajahmundry et al., 2021).

a) Modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) Modificado

El modelo modificado asume que el agua se adsorbe en múltiples capas, con una relación entre las constantes *A*, *B*, y *C* que considera la influencia directa de la temperatura. La modificación introduce un ajuste más detallado en la descripción del comportamiento del material a lo largo de un amplio rango de actividades de agua y temperaturas, optimizando su aplicabilidad para sistemas complejos (Jayas y Mazza, 1993).

El modelo GAB es adecuado para un amplio rango de actividades de agua (0.1 - 0.9). En su versión modificada, puede incluir ajustes en el factor de temperatura para mejorar la precisión a diferentes temperaturas (Jayas y Mazza, 1993). La forma básica sería:

$$M = \frac{M_0 \,.\, C \,.\, K \,.\, a_w}{(1 - K \,.\, a_w)(1 + (C - 1) \,.\, K \,.\, a_w)}$$

Donde:

M :es el contenido de humedad en base seca.

M_0 : es el contenido de humedad en el monocapa.

C y K : son constantes que dependen de la temperatura y del material.

a_w : es la actividad de agua.

Modificación: Para mejorar el ajuste en distintos rangos de temperatura, se plantea la siguiente ecuación modificada:

$$X_e = \frac{AB\left(\frac{C}{t}\right)a_w}{(1 - Ba_w)\left[1 - Ba_w + B\left(\frac{C}{t}\right)a_w\right]}$$

Donde:

X_e : contenido de humedad en equilibrio

A, B, C: constantes empíricas relacionadas con las propiedades del material y su interacción con el agua.

T : temperatura en °C.

a_w : actividad de agua

b) Modelo de Chung – Pfost Modificado

El modelo de Chung-Pfost considera que la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad se ve influenciada por la temperatura de manera logarítmica. Esta modificación ajusta la ecuación para productos higroscópicos, como la harina de quinua, cuya interacción con el agua depende notablemente de las condiciones térmicas.(Choque et al., 2018)

El modelo de Chung y Pfost (1967a, 1967b) es comúnmente empleado para predecir el contenido de humedad de equilibrio (X_e) en función de la actividad de agua (a_w) y la temperatura (T). La ecuación básica del modelo se expresa como:

$$T.\ln(a_w) = A - \frac{B}{X}$$

Modificación:

$$X_e = A - Bln[-(t + C)\ln a_w]$$

- Donde:
- X_e: contenido de humedad en equilibrio.
- a_w: actividad de agua
- *A, B* y *C*: constantes empíricas específica del material.
- *T*: temperatura en °C

c) Modelo de Henderson Modificado

El modelo de Henderson se basa en una ecuación empírica que relaciona la humedad de equilibrio con la actividad de agua y la temperatura. La modificación presentada optimiza esta relación al introducir parámetros dependientes de la temperatura, lo que lo hace especialmente útil para analizar productos agrícolas como la harina de quinua, donde las condiciones térmicas juegan un papel fundamental.(Ramirez et al., 2014)

El modelo de Henderson es ampliamente utilizado en alimentos y productos agrícolas, ya que está basado en la relación empírica entre la actividad de agua y el contenido de humedad. El modelo de Henderson en su forma básica es (Thompson et al., 1968):

$$\ln(1 - a_w) = -K \, . M^n$$

Modificación: Para incorporar el efecto de la temperatura de manera más precisa, se introduce una ecuación modificada donde la humedad de equilibrio *(X_e)* se calcula como:

$$X_e = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-A(T + B)}\right]$$

Donde:

- X_e: contenido de humedad en equilibrio.
- a_w: actividad de agua
- *A*: constante empírica específica del material
- *T*: temperatura en °C
- *B*: constante ajustada para mejorar la precisión en diferentes temperaturas.

Esta modificación ajusta la relación entre la actividad de agua y la humedad de equilibrio en función de la temperatura, permitiendo una descripción más precisa del comportamiento higroscópico de la harina de quinua.

d) Modelo de Smith Modificado

El modelo de Smith considera que el agua adsorbida en un material se encuentra distribuida en capas, con una relación logarítmica que describe la interacción entre la actividad de agua y el contenido de humedad. La modificación propuesta simplifica el cálculo del contenido de humedad, haciéndolo más directo y adecuado para una amplia gama de productos higroscópicos, como la harina de quinua (Smith, 1947).

La carta de Smith es una herramienta fundamental en la ingeniería de microondas, introducida por Philip Hagar Smith en 1939. Esta carta se basa en la concepción matemática de transformar el semiplano positivo en el círculo unitario mediante la transformación de Moëbius, expresada como M(z) = (z-1) /(z+1). El modelo Smith es útil para productos de alta humedad:

$$M = M_0 + K \,.\ln(1 - a_w)$$

Modificación: En esta versión modificada, el contenido de humedad de equilibrio *(X_e)* se expresa directamente en función de a_w, facilitando su cálculo y aplicabilidad:

$$X_e = B + A\, log(1 - a_w)$$

Donde:

- X_e: contenido de humedad en equilibrio (base seca)
- a_w: actividad de agua
- A y B: constantes empíricas que dependen de las propiedades del material y de las condiciones ambientales.

e) Modelo de Halsey Modificado

El modelo de Halsey se basa en una relación exponencial que describe la adsorción de agua en superficies de materiales. La modificación introducida incorpora un término dependiente de la temperatura, mejorando la precisión en el

análisis de sistemas donde las condiciones térmicas afectan significativamente el comportamiento higroscópico, como en la harina de quinua.(Choque et al., 2018)

Este modelo ofrece una fórmula para la condensación de multicapa a una distancia considerable de la superficie, asumiendo que la energía potencial de una molécula cambia de acuerdo con la enésima potencia inversa de su distancia a la superficie (Boquet et al., 1978). Dicho enfoque se aplica en productos alimentarios con contenido de almidón. El modelo de Halsey en su forma original es:

$$a_w = \exp\left(-\frac{A}{X_e^C}\right)$$

Modificación: La ecuación se modifica para considerar el efecto de la temperatura (t) en la relación entre X_e y a_w, expresándose como:

$$X_e = \left[-\frac{exp(A+BT)}{lna_w}\right]^{\frac{1}{C}}$$

Donde:

- X_e: contenido de humedad en equilibrio (base seca)
- a_w: actividad de agua
- A, B, y C: constantes empíricas del material.
- T: temperatura en °C.

f) Modelo de Oswin Modificado

El modelo de Oswin se basa en una ecuación empírica que relaciona la actividad de agua con el contenido de humedad de equilibrio, especialmente en productos alimenticios y agrícolas. La modificación presentada mejora la aplicabilidad del modelo en rangos amplios de temperatura, permitiendo describir con mayor precisión el comportamiento higroscópico de materiales como la harina de quinua (Vega et al., 2010).

El modelo de Oswin es otro modelo empírico utilizado en la determinación de isotermas de sorción en alimentos. El modelo Oswin es utilizado para describir materiales alimentarios con contenido de humedad intermedio (Chen y Morey, 1989):

$$w_c = A \,.\left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^{\frac{1}{C}}$$

Modificación: La versión modificada incorpora un término dependiente de la temperatura (*t*), permitiendo un ajuste más preciso en diferentes condiciones térmicas. La ecuación modificada es:

$$w_e = (A + BT)\left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^{\frac{1}{C}}$$

Donde:

- w_c: contenido de humedad en equilibrio (base seca)
- a_w: actividad de agua
- *A, B,* y *C*: constantes empíricas del material.
- *T*: temperatura en °C.

g) Modelo Harkings-Jura (modificado)

El modelo de Harkins-Jura parte del principio de que las moléculas de agua se adsorben en múltiples capas sobre una superficie heterogénea, donde la energía de adsorción disminuye con el aumento de la cobertura superficial. La modificación presentada introduce la influencia de la temperatura, lo que permite un análisis más detallado de los materiales cuya adsorción depende de las condiciones térmicas (Zeymer, 2017).

El modelo de Harkins-Jura se utiliza para describir la adsorción de agua en superficies heterogéneas, especialmente en productos alimenticios y materiales higroscópicos. (Zeymer, 2017) En su forma básica, la ecuación se expresa como:

$$a_w = \exp\left(-\frac{A}{(X_e + C)^B}\right)$$

Modificación: La ecuación modificada incorpora un término dependiente de la temperatura (*t*), adaptándola para sistemas donde las condiciones térmicas afectan significativamente la relación entre el contenido de humedad de equilibrio (X_e) y la actividad de agua (a_w). La forma modificada es

$$X_e = \frac{\exp(A - BT)}{C - lna_w}$$

Donde:

- w_c: contenido de humedad en equilibrio (base seca)
- a_w: actividad de agua
- *A, B,* y *C*: constantes empíricas del material.
- *T*: temperatura en °C.

h) Modelo Copace (modificado)

El modelo de Copage describe la relación entre el contenido de humedad de equilibrio y la actividad de agua en sistemas higroscópicos. El término dependiente de la temperatura ajusta el modelo para materiales cuya adsorción y desorción de agua están significativamente influenciadas por las condiciones térmicas. Esta modificación mejora la capacidad del modelo para predecir el comportamiento de sorción en productos alimenticios, como la harina de quinua, bajo diferentes temperaturas.(Ramirez et al., 2014)

El modelo de Copace se utiliza para describir la relación entre el contenido de humedad de equilibrio (X_e) y la actividad de agua (a_w) en materiales higroscópicos (Aguerre et al., 1986). En su forma básica, la ecuación se expresa como:

$$X_e = \exp(A + Ba_w)$$

Modificación: La ecuación modificada introduce un término dependiente de la temperatura (*t*), lo que permite que el modelo se ajuste mejor a condiciones térmicas cambiantes. La forma modificada es:

$$X_e = \exp(A - BT + Ca_w)$$

Donde:

- X_e: contenido de humedad en equilibrio (base seca)
- a_w: actividad de agua
- *A, B,* y *C*: constantes empíricas del material.
- *T*: temperatura en °C.

i) Modelo de Sigma-Copage (modificado)

El modelo Sigma-Copage es una extensión del modelo Copage, utilizado para describir la relación entre el contenido de humedad de equilibrio (X_e) y la

actividad de agua (a_w) en materiales higroscópicos, teniendo en cuenta también la influencia de la temperatura (Peleg, 2020). La ecuación básica de Sigma-Copage se expresa como:

$$X_e = \exp(A + Ba_w)$$

Modificación: La ecuación modificada del modelo Sigma-Copage incluye un término dependiente de la temperatura (t) para ajustar la sorción en condiciones térmicas variables. La forma modificada es:

$$X_e = \exp(A - BT + Ca_w)$$

Donde:

- X_e: contenido de humedad en equilibrio (base seca)
- a_w: actividad de agua
- A, B, y C: constantes empíricas del material.
- T: temperatura en °C.

j) Modelo de Sigma-Copage II (modificado)

El modelo Sigma-Copage II es una variación del modelo Sigma-Copage, utilizado para describir la relación entre el contenido de humedad de equilibrio (X_e) y la actividad de agua (a_w), teniendo en cuenta la influencia tanto de la temperatura como de la actividad de agua en la sorción (Aguerre et al., 1986). La ecuación básica del modelo Sigma-Copage II se expresa como:

$$X_e = \frac{1}{A + Ba_w}$$

Modificación: La ecuación modificada introduce un término dependiente de la temperatura (t) para ajustar el modelo en condiciones térmicas cambiantes. La forma modificada es:

$$X_e = \frac{1}{AT^B + {a_w}^C}$$

Donde:

- w_c: contenido de humedad en equilibrio (base seca)
- a_w: actividad de agua
- *A, B,* y *C*: constantes empíricas del material.
- *T*: temperatura en °C.

2.2.6. Propiedades Termodinámicas

D'Aria et al. (2022) definen algunas propiedades termodinámicas en alimentos de la siguiente manera:

- **Calor isotérmico**: Energía requerida para remover el agua que contiene cada alimento. Esto corresponde a la entalpía de vaporización de agua de un alimento, que siempre es mayor que el vapor de agua.

- **La entalpía** se define como la cantidad de calor liberada o absorbida durante una reacción química a presión constante. Representa la variación de la energía interna del sistema más el trabajo realizado por fuerzas externas, ya sea positivoo negativo

- **La entropía** está vinculada a los reordenamientos espaciales en la interfaz entreel agua y el soluto. El nivel de desorden juega un papel crucial en la espontaneidad de los procesos químicos, donde un sistema más desordenado se refleja en una entropía mayor. Un cambio positivo en la entropía (ΔS) señala que el estado final es más desordenado que el estado inicial.

- **La energía de activación** se define como la energía requerida para formar o romper la primera monocapa de agua en la interfaz entre el sistema sólido y el agua. En este contexto, la formación del enlace sólido-agua (adsorción) demanda más energía que la ruptura de esta unión (desorción).

- **La energía libre de Gibbs** se utiliza como un criterio fundamental para determinar la espontaneidad de los procesos termodinámicos. Cada punto de humedad en equilibrio exhibe un valor mínimo y negativo de energía libre de Gibbs. A medida que la cantidad de agua adsorbida en la superficie de la matriz alimenticia aumenta, la energía libre de Gibbs tiende a disminuir

hasta alcanzar valores cercanos a cero.

- **Teoría de Compensación Entalpía-Entropía** La teoría de compensación entalpía-entropía se refiere a un fenómeno termodinámico en el que los cambios en la entalpía (ΔH) y la entropía (ΔS) de un sistema están linealmente relacionados, lo que implica que un aumento en la entalpía suele estar compensado por una disminución de la entropía y viceversa (McMinn y Magee, 2003). Este fenómeno es común en procesos de sorción, reacciones químicas y otras interacciones moleculares, y sugiere que las variaciones en las fuerzas atractivas entre las moléculas de agua y la superficie del material están balanceadas por la reorganización estructural de las moléculas de agua y el material adsorbente.

  Matemáticamente, esta relación se expresa como:

$$\Delta G = \Delta \mathrm{h} - \mathrm{T}_{\beta} \,.\, \Delta \mathrm{S}$$

$$\Delta h = \mathrm{T}_{\beta} \,.\, \Delta \mathrm{S} + \Delta G$$

  Donde:

  - Δh es la entalpía de sorción
  - $\Delta \mathrm{S}$ es la entropía de sorción
  - T_{β} es la temperatura isocinética
  - ΔG es la energía libre de Gibbs, a la temperatura isocinética

2.2.7. Espectrofotometría Infrarroja por transformadas de Fourier.

La espectrofotometría infrarroja (FTIR) es una técnica analítica que mide la absorción de radiación infrarroja por parte de las moléculas, lo que induce vibraciones específicas en los enlaces químicos. Estas vibraciones actúan como una "huella digital" única para cada sustancia, permitiendo su identificación y caracterización. La región infrarroja del espectro electromagnético se divide en tres zonas: infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo lejano (FIR), siendo el MIR (4000-400 cm□¹) la más utilizada en análisis cualitativos y cuantitativos de alimentos (Pereda, 2016)

De acuerdo con Lopez et al. (2022) Dependiendo del objetivo del análisis, se emplean diferentes técnicas de espectroscopia:

- FTIR (Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier): Ofrece espectros de alta resolución, siendo ideal para la identificación de componentes específicos en la harina de quinua.

- NIR (Infrarrojo Cercano): Adecuado para análisis cuantitativos rápidos, como la determinación de contenido de humedad, proteínas y lípidos.

- ATR-FTIR (Reflectancia Total Atenuada): Permite el análisis directo de muestras sólidas o líquidas sin necesidad de preparación previa, facilitando el estudio de la harina de quinua en su estado natural**.**

2.3. Definición de términos

a) **Isotermas de sorción:** Gráficas que relacionan el contenido de humedad de un material con su actividad de agua a temperatura constante, fundamentales para entender cómo interactúa la harina de quinua con la humedad (Osmayo Huacan, 2023).
b) **Actividad de agua (aw):** Proporción de agua disponible en un alimento para reacciones químicas o crecimiento microbiano. Es la relación entre la presión de vapor del agua en el producto y la del agua pura a la misma temperatura (Tapia, 2020).
c) **Humedad de equilibrio:** Cantidad de agua que un material retiene cuando está en equilibrio con la humedad relativa del ambiente (Cartagena Gordillo, 2022).
d) **Granulometría:** Distribución del tamaño de las partículas de un material. En la harina de quinua, influye en la estabilidad y propiedades de sorción (Casbis et al., 2022).
e) **Calor isostérico de adsorción:** Cantidad de energía que se disipa durante el proceso de adsorción o la energía que se necesita para la desorción (Terán Chamba, 2023).
f) **Entropía:** Mide el desorden en un sistema. En la harina de quinua, evalúa el desorden asociado al proceso de sorción de agua (Stalmans, 2024).

g) **Energía libre de Gibbs:** Energía disponible para realizar trabajo en un sistema, utilizada para predecir la espontaneidad de la sorción (Enríquez, 2022).

h) **Compensación entalpía-entropía:** Relación entre cambios energéticos y de desorden que afecta la estabilidad del producto (Stalmans, 2024).

i) **Espectroscopía FTIR:** Técnica que identifica grupos funcionales en la harina de quinua al medir la absorción de radiación infrarroja (Nagaya et al., 2024).

j) **Modelos matemáticos de isotermas:** Herramientas para describir la sorción de agua según la actividad de agua y el contenido de humedad, permitiendo evaluar el modelo que mejor ajusta los datos experimentales (Cárdenas, 2021)**.**

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

El presente estudio es de tipo aplicativo y el nivel de investigación es explicativo.

3.2. Ámbito temporal y espacial

La presente investigación tuvo un periodo de ocho meses, durante los cuales se realizó todas las etapas del estudio, desde la recolección de muestras de harina de quinua hasta la realización de los análisis experimentales y el procesamiento de los datos obtenidos. En este tiempo, se evaluarán las propiedades de sorción de agua en diferentes granulometrías de la harina de quinua y se realizó los ensayos termodinámicos a distintas temperaturas (20, 30 y 40 °C). Este plazo fue adecuado para garantizar la recolección de datos precisos y suficientes para el modelado matemático y el análisis de las propiedades estudiadas.

En cuanto al ámbito espacial, la investigación se desarrolló en el Laboratorio de Análisis de Análisis de Productos Agroindustriales de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial - campus de la Universidad Nacional de Moquegua, donde se dispuso de los equipos y recursos necesarios para llevar a cabo los análisis experimentales, incluyendo la técnica de punto de rocío para medir la actividad de agua y la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de la identificación de grupos funcionales.

3.3. Población y muestra

El trabajo de investigación se desarrolló en las instalaciones del Laboratorio de Análisis de Productos de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial campus de la Universidad Nacional de Moquegua.

Para este estudio se adquirió 15 kg harina de quinua perlada de la variedad INIA 415 – Pasankalla, de la empresa Agroindustrias Andinas Altiplano S.R.L de la ciudad de Juliaca. La harina de quinua se obtuvo de la molienda por un molino de martillo con una criba de 0.5 mm N° 35, la harina de quinua fue comprada en

envase primario de papel Kraft multifolio y protegido con envase secundario de bolsa de polipropileno (PP) con capacidad de 5 kg.

3.3.1. Clasificación Granulométrica de la muestra

La harina de quinua se clasificó utilizando un muestreo aleatorio simple, seleccionando una muestra representativa.

El análisis se realizó empleando un tamizador vibracional Ana Lysette 18 (Fritsch GmbH, Idar-Oberstein, Alemania) con una muestra representativa de aproximadamente 210 g, siguiendo el procedimiento descrito por Dussán et al. (2019). El equipo se configuró con un tiempo de tamizado de 5 minutos, una amplitud de 2 mm y pausas de 5 segundos entre intervalos.

Las muestras seleccionadas fueron: tamiz malla N° 60 (250 µm) y N° 200 (75 µm). Posteriormente, se almacenaron en bolsas Ziploc de polietileno de baja densidad (6 cm x 4 cm) cubiertas con papel aluminio para evitar la absorción de humedad externa, manteniéndolas a temperatura ambiente.

3.4. Instrumentos

3.4.1. Equipos

- Estufa (Memmert, UN55, Alemania)
- Balanza analítica (ENTRIS224-1S, Sartorius Lab Instruments GmbH & Co, KG, Goettingen, Alemania)
- Congeladora (modelo Rh25h5613sg, Samsung)
- Tamiz vibratorio (Analysette 3 pro, Fritsch, Idar-Oberstein, Alemania)
- Colorímetro CR-200: Un colorímetro CR-200 (Konica Minolta Sensing, Japón)
- Medidor de actividad de agua Aqualab PRE:
- Espectrofotómetro Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) con un accesorio ATR
- Analizador de sorción de vapor (VSA 1122, Decágono Devices, USA).

3.4.2. Materiales

- Papel Aluminio
- Bolsas Ziploc de 26.8 x 27.3.
- Bolsas Ziploc de 60 * 80
- Espátulas de acero inoxidable
- Guantes sintéticos
- Vasos de precipitados de vidrio (50, 100 y 250 mL)

3.4.3. Insumos y reactivos

- Agua destilada para limpieza del VA
- Agua Ultrapura para el tanque de agua del equipo VSA
- Alcohol 95%, p/p como agente desinfectante
- Estándar de Cloruro de sodio NaCl in H2O 2.33 mol/kg de 0.920 de actividad de agua
- Estándar de Cloruro de sodio NaCl in H2O 6.00 mol/kg de 0.76 de actividad de agua
- Estándar de Cloruro de litio LiCl in H2O 8.57 mol/kg de 0.500 de actividad de agua
- Estándar de Cloruro de litio LiCl in H2O 13.41 mol/kg de 0.250 de actividad de agua
- Celulosa Microcristalina

3.5. Procedimientos

3.5.1. Determinación del Color

De acuerdo con Dussán et al. (2019), el color de las muestras fue evaluado por duplicado utilizando un colorímetro CR-200 (Konica Minolta Sensing, Japón), previamente calibrado con una placa de calibración blanca estándar proporcionada por el fabricante. Para garantizar la precisión, se empleó un paño suave y sin pelusa para limpiar tanto la lente como la placa de calibración, evitando la exposición a luz directa, polvo o humedad. Para preparar las muestras de harina, se colocó la harina de quinua en un recipiente asegurándose de cubrir completamente el fondo, eliminando cualquier influencia externa en la medición. La harina se extendió de

manera uniforme, eliminando grumos y homogenizando la superficie. Se registraron los parámetros de luminosidad e índice de claridad (L*), rojo-verde (a*) y amarillo-azul (b*), tomando mediciones en cinco puntos diferentes de cada muestra. Las lecturas se realizaron directamente con un ángulo de observación de 10° desde el medidor de color hacia la porta muestra.

De acuerdo con Dussán et al. (2019) se determinó los valores de de Croma (C) y tono (H) con las siguientes ecuaciones:

$$C = \sqrt{(a*^2 + b*^2)}$$

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

Donde:

a∗ : Representa el eje rojo (+) hacia verde (-).

b∗ : Representa el eje amarillo (+) hacia azul (-).

C : Vector resultante que indica la pureza o saturación del color.

H : Es el ángulo de tono expresado en grados (0° rojo y 90° amarillo, 180° verde y 270° azul).

3.5.2. Determinación de la humedad.

El contenido inicial de humedad en la harina de quinua se determinó utilizando un método gravimétrico basado en la técnica descrita por Pumacahua-Ramos et al. (2016). Para ello, se colocaron muestras de harina de quinua (2 g) en una estufa (Memmert, UN55, Alemania) a 105 °C durante 24 horas. Los resultados se expresaron como porcentaje de humedad.

$$X_{bs} = \frac{P_i - P_f}{P_f} x100$$

Donde: X_{bs} es el contenido de humedad en equilibrio (% base seca), P_i es el peso inicial de la muestra húmeda (g), P_f es el peso final de la muestra seca (g).

3.5.3. Determinación de Actividad de Agua

La actividad de agua de la harina de quinua fue medida utilizando un medidor específico de actividad de agua (Pre Aqualab, Decagon, USA) a una temperatura de lectura de 25 °C, realizando el análisis por triplicado. Para verificar la exactitud, se realizaron pruebas con patrones desechables de Aw en duplicado, utilizando soluciones de LiCl con concentración de Aw 0.500.

3.5.4. Determinación de las Isotermas de sorción

Se determinó las isotermas de sorción de vapor de agua, por medio de un analizador de sorción de vapor (VSA 1122, Decagon Devices, USA). El equipo trabajará a temperaturas de 20°C, 30°C y 40°C, y permitió generar isotermas en el intervalo de $0.1 \geq aw \leq 0.95$. se realizaron pruebas con patrones desechables de Aw, utilizando soluciones de LiCl con concentraciones de 13.41 mol/L, 8.57 mol/L con valores de Aw de 0.250, 0.500 y NaCl con concentraciones de 6.00 mol/L y 2.33 mol/L, correspondientes a valores 0.760 y 0.920, respectivamente a temperatura de ambiente 25 °C.

Cada isoterma se generó en el intervalo de $0,1 > aw < 0,9$ a temperatura ambiente (25 °C). Se utilizará el método DVS (Dynamic vapor sorption), con paso de aw de 0,1, tolerancia de 0,1% de variación de masa (weight trigger) y timeout desactivado (tiempo de trabajo indeterminado). Se utilizaron los puntos de equilibrio para la generación de isotermas, Se utilizaron los puntos de equilibrio para la generación de isotermas, siendo los demás descartados.

3.5.5. Modelamiento matemático

Los datos obtenidos de contenido de humedad y actividad de agua a diferentes temperaturas han sido modelados utilizando 10 modelos matemáticos que de acuerdo con la revisión bibliográfica se modelara con los siguientes modelos: Henderson Modificado, Chung -Pfost modificado, Halsey modificado, Oswin modificado, GAB modificado, Harkings-Jura, Smith, Copace, Sigma-Copage, Sigma-Copage II.

Ecuaciones de modelos matemáticas

Henderson Modificado	$X_e = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-A(T+B)}\right]$	(1)
Chung -Pfost modificado	$X_e = A - Bln[-(T+C)lna_w]$	(2)
Halsey modificado	$X_e = \left[-\frac{\exp(A+BT)}{\ln a_w}\right]^{\frac{1}{C}}$	(3)
Oswin modificado	$w_e = (A+BT)\left(\frac{a_w}{1-a_w}\right)^{\frac{1}{C}}$	(4)
GAB modificado	$X_e = \frac{AB\left(\frac{C}{T}\right)a_w}{(1-Ba_w)\left[1-Ba_w+B\left(\frac{C}{T}\right)a_w\right]}$	(5)
Harkings-Jura	$X_e = \frac{\exp(A-BT)}{C-lna_w}$	(6)
Smith	$X_e = B + A\,log(1-a_w)$	(7)
Copace	$X_e = \exp(A-BT+Ca_w)$	(8)
Sigma-Copace	$X_e = \exp(A-BT+Ca_w)$	(9)
Sigma-Copace II	$X_e = \frac{1}{AT^B + {a_w}^C}$	(10)

Donde X_e es el contenido de humedad en equilibrio (% base seca), a_w es la actividad de agua, *T* es la temperatura (°C), A, B y C son constantes.

3.5.6. Determinación de las Propiedades Termodinámicas

Las propiedades termodinámicas de las diferente granulometría de harina de quinua se determinó según el método propuesto por (Bustos et al., 2018) como se expresan en las Ecuaciones 11 al 16.

Ecuaciones termodinámicas

$$ln\, a_w = \pm\left(\frac{q_s}{RT_a} - \frac{\Delta S}{R}\right) \quad (11)$$

$$Q_s = q_s + L \quad (12)$$

$$\Delta G = \pm RT_a\, ln\, a_w \quad (13)$$

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{T_a}} \quad (14)$$

$$T_B = \widehat{T_B} \pm t_{(m-2,\, \frac{\alpha}{2})}\sqrt{var(T_B)} \quad (15)$$

$$q_s = T_B \Delta S + \Delta G_B \quad (16)$$

Dónde: R es constante universal de gases (8.314 J/mol K), T_a es temperatura absoluta (K), q_s es calor isostérico neto de sorción (kJ/kg), L es calor latente de vaporización de agua libre (kJ/kg), Q_{st} es calor isostérico total (kJ/kg), ΔS es entropía de sorción (kJ/kg K), ΔG es energía libre de Gibbs (kJ/kg), T_β es temperatura isocinética (K), T_{hm} es temperatura media armónica (K), n es número de temperaturas utilizadas, y m es número de pares de datos de entalpía y entropía.

3.5.7. Análisis de Espectrofotometría Infrarroja

Se utilizó un espectroscopio infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), modelo *Perkin Elmer Spectrum Two*, equipado con un accesorio universal ATR, para analizar los grupos funcionales de las harinas de quinua el equipo se configuró con un rango de números de onda entre 4000 y 600 cm□¹, realizando 16 escaneos con una resolución espectral de 4 cm□¹ a una temperatura de 24 °C. Antes de cada prueba, se efectuó un barrido en blanco para eliminar el ruido. La muestra de harina de quinua se aplicó de forma que cubriera completamente el prisma, utilizando una fuerza de compresión en el rango de 100 a 105 N (Contreras-Jimenez et al., 2019).

3.6. Análisis de datos

- Los datos experimentales de las propiedades de los diferentes tamaños de partícula de las harinas de quinua se expresaron como promedio ± desviación estándar.
- La diferencia de color entre las muestras con diferentes tamaños de partícula se analizó mediante la prueba t-Student (significancia del 5%), considerando varianzas no homogéneas, usando el software SPSS.
- Todos los cálculos y análisis estadísticos se realizaron con el programa Microsoft Excel para Windows.
- Se determino los modelos de ajuste de las isotermas de sorción, tres parámetros serán utilizados: coeficiente de correlación (R^2), suma de cuadrados del error (*SSE*), el error medio relativo del contenido de humedad (MRE%).

$$MRE\% = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{[Y-\bar{Y}]}{\bar{Y}} \tag{17}$$

$$SSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y-\bar{Y})^2}{df}} \tag{18}$$

Dónde: $\bar{Y}$ es el contenido de humedad experimental (% humedad en base seca), *Y* es el contenido de humedad calculado (% humedad en base seca), *N* es el número de datos, *n* es el número de constantes e *i* es el número de términos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Granulometría de la harina de quinua

El tamizado (tamices #60, #100, #140 y #200) de harina de quinua mostró que los tamices #60 (250 µm) y #200 (75 µm), fueron los de mayor proporción (Tabla 5.). Este comportamiento se alinea con lo reportado por Alvarado et al. (2020), quienes utilizaron mallas similares para garantizar uniformidad en la granulometría de harinas malteadas. Además, estos resultados son consistentes con J. Campos et al. (2022), quienes mencionan que el tamaño promedio de los granos de quinua es de aproximadamente 1.8 mm, lo que podría explicar la retención predominante en tamices de apertura intermedia como el #60 (250 µm). Por otro lado, el tamiz #200 (75 µm) muestra una proporción significativa de partículas finas, y esto sugiere que las harinas evaluadas presentan una distribución de partículas relativamente homogénea, similar a lo reportado por Coţovanu et al. (2021), quienes señalaron que las fracciones más pequeñas (<180 µm) impactan en la estructura y propiedades fisicoquímicas de las harinas.

Tabla 5

Clasificación granulométrica de la harina de quinua

Tamiz	Promedio
# 60 (250 µm)	25.82% ± 2.02%
# 200 (75 µm)	16.43% ± 1.59%
Residual	1.95% ± 0.84%

Nota. No se consideró la granulometría residual por ser un porcentaje muy pequeño

4.2. Análisis de Color

El análisis del color (tabla 6) en la harina de quinua (L*, a*, b*) con diferente granulometría constituye un paso esencial para comprender su influencia en la calidad y estabilidad del producto (Dussán et al., 2019). Estos parámetros, vinculados a propiedades fisicoquímicas fundamentales, permiten evaluar cómo varían las características ópticas y funcionales según el tamaño de partícula. Además, el color, descrito mediante coordenadas cromáticas (c*, h), proporcionando información sobre la apariencia y posibles transformaciones

durante el procesamiento, facilitando la identificación de patrones que puedan optimizar su aplicación en la industria alimentaria (Dussán et al., 2019).

Tabla 6

Parámetros de Color a diferente tamaño de partícula.

Harina de Quinua	Parámetros de color				
	L*	**a***	**b***	**C**	**H**
Pasankalla N# 60 (250 µm)	$72.50^{a} \pm 0.17$	$5.03^{a} \pm 0.06$	$12.73^{a} \pm 0.06$	$13.69^{a} \pm 0.07$	$68.43^{\circ a} \pm 0.14$
Pasankalla 200 (75 µm)	$75.67^{b} \pm 1.24$	$4.47^{b} \pm 0.06$	$13.27^{a} \pm 0.29$	$14.00^{a} \pm 0.28$	$71.39^{\circ a} \pm 0.33$

De acuerdo con los resultados de Pasankalla #200 (75 µm) con un L* de 75.67. Este resultado coincide parcialmente con los reportados por Coţovanu et al. (2021), quienes observaron que la disminución del tamaño de partícula reduce la luminosidad en harinas compuestas, mientras que en este estudio las harinas más finas resultaron más claras. Esto podría explicarse por la mayor homogeneidad en la distribución de partículas finas, que reflejan más luz, como también lo sugieren los promedios de L*, adicionalmente, los valores de L* de la harina de quinua en este estudio son similares a los observados en la harina de chontaduro estudiada por Dussán et al. (2019), aunque el rango obtenido en las harinas evaluadas aquí está por debajo del valor reportado para la harina de quinua blanca por estos mismos autores (84,87 ± 1,5).

El promedio de a* es mayor en las harinas de granulometría gruesa (#60), lo que refleja una tonalidad rojiza más intensa, este comportamiento podría estar asociado con una menor exposición de pigmentos sensibles durante la molienda gruesa, preservando así su intensidad, como se deduce también del trabajo Y. Campos et al. (2022), donde variedades como la roja muestran valores altos de a* (30,487), en comparación con la quinua blanca (-0,752).

Con respecto El promedio de b* es mayor en la harina de granulometría fina (#200), lo que refleja una tonalidad más intensa de color amarillo (Figura 6) el cual

se evidencia una clara tendencia más amarillenta del tamaño (#60) y de acuerdo con Dussán et al. (2019), el color amarillo puede deberse a la cantidad de carotenoides presentes. En conclusión, se observa que las harinas de quinua presentan valores de diferencia de color significativos.

El croma (C), indicador de la saturación del color, muestra una mayor intensidad en granulometrías finas lo que sugiere que las partículas más pequeñas exponen mejor los componentes cromóforos. Este resultado se alinea con la tendencia descrita por Coţovanu et al. (2021), donde las propiedades cromáticas de harinas y productos se ven afectadas significativamente por el tamaño de partícula. Por otro lado, el tono (H) se obtuvo para el tamaño #200 71.39° y #60 68.43° donde se evidencia diferencias entre las granulometrías y que el matiz general del color se conserva, coincidiendo con estudios como el de Dussán et al. (2019) donde los cambios en el tono tras el procesamiento son mínimos y obtienen para la harina de quinua un tono de 84.8 ° el cual indica que está en el 1 cuadrante cercano a 90° que representa un color amarillento y si el valor se acercó a 0° representa un color rojizo

4.3. Análisis de Humedad y actividad de agua

Los datos del contenido de humedad de harina de quinua son reportados en la Tabla 7, y se encontraron en el rango de 9.6 -12% (expresado en base seca), cumpliendo con el contenido de humedad de la NTP 011.451 que requiere un contenido de humedad máximo de 13.5% (INACAL, 2018). Los valores reportados fueron similares a los mostrados en harina de quinua no malteada de las variedades blanca, roja y negra, con valores entre 10.02 – 11.41% (Alvarado et al., 2020). Por otro lado, los valores de actividad de agua en la harina de quinua PK (Tabla 7) fueron bajos, indicando un estado de conservación adecuado, ya que, alimentos con actividad de agua menores a 0.65 pueden ser almacenados por largos periodos de tiempo sin el desarrollo y la proliferación de hongos. (Pumacahua-Ramos et al., 2016).

Tabla 7

Contenido de humedad y actividad de agua de harina de quinua de la variedad Pasankalla

Tamaño de partícula	% Humedad*	Aw
N# 60 (250 µm)	$11.82^{a} \pm 0.210$	$0.361^{a} \pm 0.007$
N# 200 (75 µm)	$9.65^{b} \pm 0.035$	$0.333^{b} \pm 0.006$

*Expresado en base seca

Estos resultados son reportados por Cotovanu et al. (2022), quienes destacaron que la reducción del tamaño de partícula disminuye el contenido de humedad, atribuible al calor generado durante el proceso de molienda. La molienda fina N# 200 (75 µm) ASTM en este caso parece haber reducido la capacidad de la harina para retener agua, posiblemente debido a un aumento en el área superficial que favorece la pérdida de humedad. Asimismo, Campos et al. (2022) identificaron que la quinua en estado seco presenta un bajo contenido de humedad de 5.23 g/100g, lo cual respalda la estabilidad observada en las muestras de Pasankalla evaluadas.

La Aw medida en las muestras (0.333-0.361) refleja un bajo nivel, consistente con la estabilidad microbiana reportada por Dussán et al. (2019), quienes asociaron una baja actividad de agua en harinas con una mayor estabilidad durante el almacenamiento. Además, los valores de Aw encontrados son ligeramente inferiores al óptimo de 0.39 señalado por Siquira et al. (2024) para la preservación de harinas, lo que sugiere que las muestras de Pasankalla tienen buenas perspectivas de conservación bajo condiciones adecuadas.

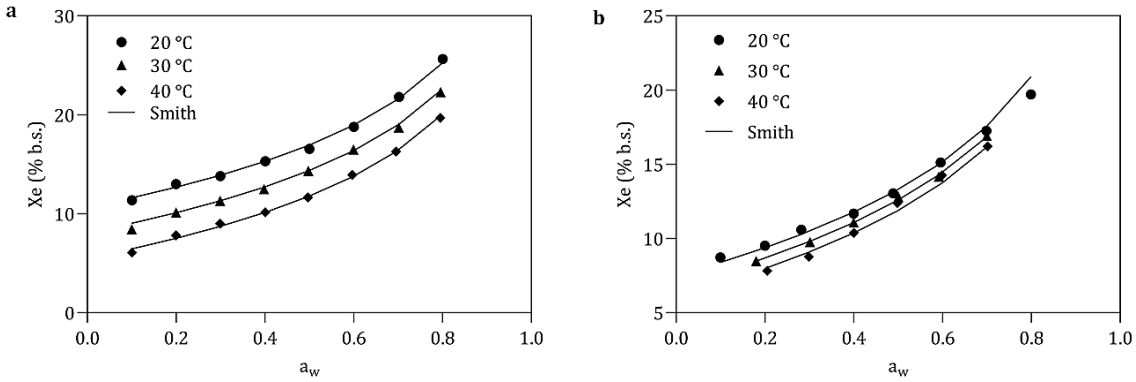
A diferencia de los estudios de (Arocutipa & Delgado, 2022), que exploraron el comportamiento higroscópico en diferentes temperaturas, este trabajo evaluó las propiedades a temperatura constante. Sin embargo, las tendencias de disminución de humedad con reducción de tamaño y el bajo Aw son consistentes con las observaciones de que menores contenidos de agua en equilibrio reducen la higroscopicidad, lo cual favorece la estabilidad.

4.4. Obtención de las Isotermas de sorción

Las isotermas de sorción de humedad de harina de quinua, de tamaño #60 (250 µm) y #200 (75 µm) a 20, 30 y 40 °C son mostrados en la figura 3.

Figura 3

Isotermas de sorción de harina de quinua tamaño # 60 (a) y tamaño 200 (b)



Las isotermas de sorción de humedad demostraron un incremento en el contenido de humedad en equilibrio con el incremento de la actividad de agua a temperatura constante. Mostrando una curva de forma sigmoidal, siendo así una isoterma de tipo II, característico de alimentos ricos en proteínas y carbohidratos. Esta forma y comportamiento también fue encontrado en harina de quinua malteada y no malteada (Alvarado-Yupanqui et al., 2020), granos de quinua (Arslan-Tontul, 2021; Bustos-vanegas et al., 2018; Miranda et al., 2012; Pumacahua-Ramos et al., 2016; Tolaba et al., 2004) y almidón de papa (Al-Muhtaseb et al., 2004a). Así mismo, la temperatura afecta a la movilidad de las moléculas de agua y al equilibrio dinámico entre las fases de vapor y fase adsorbida (Al-Muhtaseb et al., 2004a).

Los datos indican que el contenido de humedad en equilibrio disminuye con el incremento de la temperatura a una actividad de agua constante, indicando así que el almidón presente en la harina de quinua llega a ser menos higroscópico. Este comportamiento puede ser atribuido a la reducción en el total de sitios activos de unión con las moléculas de agua como resultado de los cambios en la estructura del almidón (desnaturalización parcial del almidón) en el producto por el cambio de temperatura (Al-Muhtaseb et al., 2004a).

La relación directa entre el aumento de Aw y el incremento del contenido de humedad en equilibrio demuestra la adsorción progresiva de agua en las moléculas presentes en la harina, tal como se describe en los antecedentes. Este comportamiento es típico en productos alimenticios donde la estructura interna contiene sitios (en su mayoría almidones) de enlace disponibles para interactuar con las moléculas de agua, especialmente en la región de agua débilmente ligada y libre, según Alvarado et al. (2020)

La disminución del contenido de humedad en equilibrio con el incremento de la temperatura a una Aw constante, observada en este trabajo, coincide con lo reportado por (Arocutipa & Delgado, 2022). Este fenómeno se explica por la reducción en la higroscopicidad del almidón presente en la harina de quinua, atribuible a la disminución de los sitios activos de unión para el agua, la mayor movilidad molecular a temperaturas elevadas favorece el equilibrio dinámico hacia la fase de vapor, reduciendo la capacidad de retención de agua en la matriz sólida.

El tipo de isoterma observada en este estudio también se encuentra en harinas de quinua malteada y no malteada, granos de quinua y almidón de papa, como mencionan Alvarado et al. (2020) y Arocutipa & Delgado (2022). La presencia de almidones y proteínas en la harina es un factor determinante en la forma de la curva, ya que estos compuestos contribuyen significativamente a la adsorción de agua. A temperaturas más altas, se producen cambios físicos y químicos en la matriz del almidón, reduciendo la capacidad de adsorción.

Este estudio destaca la importancia de controlar la temperatura y la actividad de agua en el almacenamiento y procesamiento de la harina de quinua. Una baja higroscopicidad a altas temperaturas mejora la estabilidad del producto, siempre que la Aw se mantenga en niveles adecuados para prevenir reacciones químicas y proliferación microbiana Siqueira-de-Lima et al. (2024)

4.5. Modelamiento matemático

Tabla 8

Ajuste y coeficientes de modelos matemáticos para isotermas de sorción.

Adsorción											
Tamaño de Tamiz	Parámetros	Henderson modificado	Chung-Pfost modificado	Halsey modificado	Oswin modificado	GAB modificado	Harkins - Jura	Smith	Copace	Sigma-Copace	Sigma-Copace II
Variedad Pasankalla											
200	A	1.80E-05	26.752	6.174	12.808	9.212	2.897	8.924	2.005	1.362	0.086
	B	21.476	4.624	0.000	0.000	0.674	0.000	0.070	0.003	0.005	8.07E-05
	C	2.592	0.431	2.572	3.200	685.894	0.714	8.343	1.309	0.796	90.343
	R^2	0.956	0.958	0.962	0.951	0.980	0.948	0.991	0.987	0.986	0.041
	MRE (%)	**4.503**	**9.006**	**5.014**	**5.534**	**3.110**	**6.202**	**1.758**	**2.614**	**2.594**	**21.989**
	SEE	0.778	1.252	0.725	0.844	0.539	0.997	0.384	0.411	0.464	3.641
	Gráfico residual	**R**	**R**	**T**	**R**	**R**	**R**	**R**	**R**	**R**	**T**
60	A	3.16E-05	33.109	6.105	14.620	15.607	3.186	15.833	2.508	1.804	0.072
	B	0.000	6.077	0.000	0.000	0.436	0.000	0.258	0.017	0.015	8.11E-05
	C	2.451	0.000	2.437	3.335	352.978	0.937	9.072	1.344	0.792	90.347
	R^2	0.947	0.977	0.813	0.804	0.874	0.786	0.998	0.980	0.984	0.190
	MRE (%)	**6.674**	**4.507**	**13.800**	**14.020**	**10.886**	**14.428**	**1.633**	**4.187**	**4.464**	**31.019**
	SEE	1.228	0.795	2.256	2.319	1.905	2.437	0.262	0.748	0.681	5.227
	Gráfico residual	**R**	**R**	**T**	**T**	**T**	**T**	**R**	**R**	**R**	**T**

Nota. A,B y C son constantes, R^2 es el Coeficiente de determinación, MRE% es el error cuadrático medio, SEE es el error estándar, R es aleatorizado y T es tendencioso.

Los parámetros de los modelos de sorción de humedad de harina de quinua, de de tamaño #60 (250 µm) y #200 (75 µm) son mostrados en la Tabla 8, junto a los parámetros estadísticos

Los resultados mostraron que el modelo matemático modificado de Smith fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales en ambos tamaños de harina de quinua, ya que mostró el menor error relativo medio (1.76 y 1.63) y en el análisis de residuos se pudo observar una disposición aleatoria. El modelo de GAB (independiente de la temperatura) fue reportado como el mejor modelo de ajuste de datos experimentales de isotermas de adsorción harina de quinua malteada y no malteada a 25 °C (Alvarado et al., 2020). El modelo de Smith (independiente de la temperatura) es también reportado como el mejor modelo de ajuste a datos experimentales de isotermas de adsorción y desorción de semillas de quina a 15, 25, 35 y 50 °C (Arslan, 2021). El modelo de Sigma-Copace II presentó el menor ajuste de los datos experimentales de las isotermas de sorción de harina de quinua.

Adicionalmente, de acuerdo con el error relativo medio y al análisis de residuos, las isotermas de sorción de humedad de harina de quinua tamaño N#60 (250 µm) puede ser adecuadamente descritas por los modelos modificados de Smith, Copac, Sigma Copace y Henderson; y para la harina quinua tamaño N# 200 (75 µm) pueden ser adecuadamente descritos por los modelos modificados de Smith, Copac, Sigma Copace y Chung-Pfost.

4.6. Propiedades termodinámicas

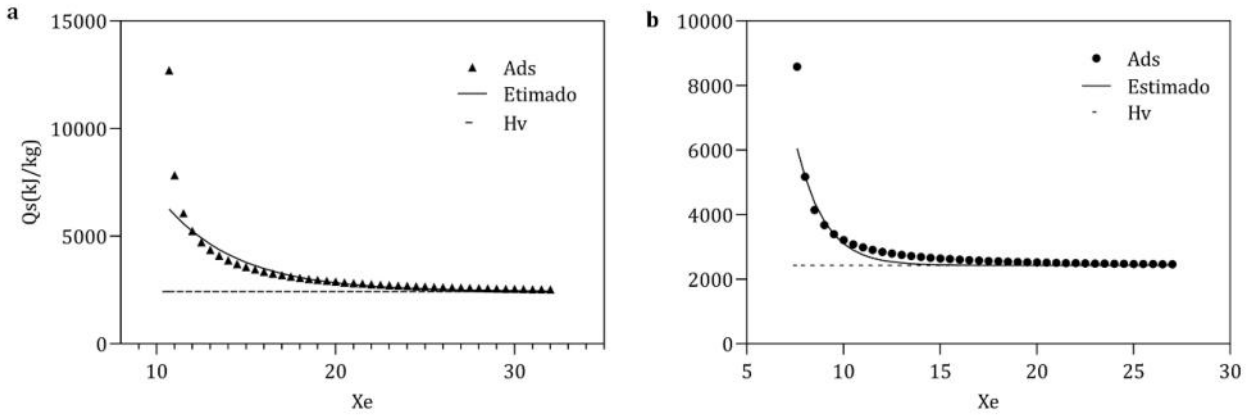
4.6.1. Entalpía de sorción

La entalpía de sorción es un importante indicador de la interacción entre el agua y el alimento. de acuerdo con la Figura 4, La entalpía de sorción mostró un comportamiento decreciente con el incremento del contenido de humedad en equilibrio, con una fuerte caída entre el contenido de humedad de 10.7 – 11.5 (250 µm) y 7.6 – 8.5 (75 µm). A menores contenidos de humedad en equilibrio, los valores de entalpía de sorción tuvieron un máximo valor de 12711.96 y 8586.34 kJ/kg respectivamente, ya que el grado de fijación del agua a la superficie de los alimentos es muy elevado (Martín-Santos et al., 2012), sin embargo, un pequeño incremento en el contenido de humedad provoca una notable caída de la magnitud de este parámetro, y esta tendencia se suaviza

hasta alcanzar valores por encima de 12% y 9% respectivamente. Para valores de contenido de humedad elevados, los valores de la entalpía de sorción son muy cercanos a la entalpía de vaporización de agua pura, siendo esta un indicio de agua en forma libre (McMinn & Magee, 2003). Este comportamiento también fue reportado en harina de trigo (Martín-Santos et al., 2012), harina de cúrcuma (Siqueira-de-Lima et al., 2024), almidón de papa (McMinn et al., 2004) y granos de quinua (Arslan-Tontul, 2021).

Figura 4

Entalpía de sorción de humedad de harina de quinua tamaño N# 60 (a) y N# 200 (b)

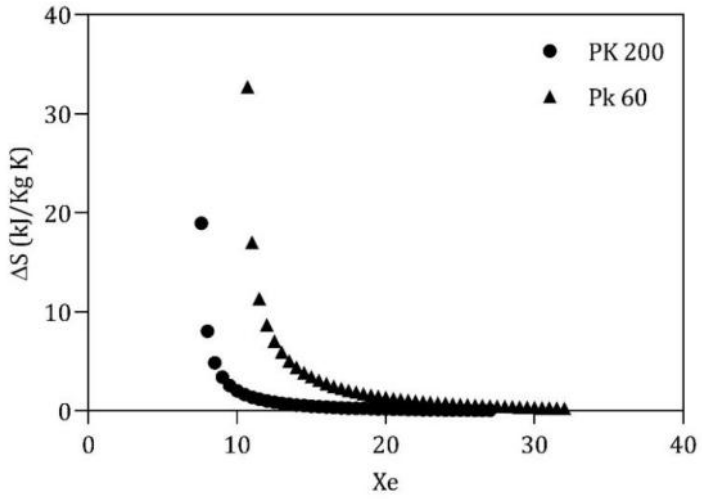


4.6.2. Entropía de sorción

La proporción del orden o desorden de un sistema durante la sorción de vapor de agua puede ser descrita por la entropía de sorción debido a su asociación con las disposiciones espaciales en la interfaz agua-sorbente y, por tanto, su relación con las fuerzas de unión y repulsión del sistema (Siqueira-de-Lima et al., 2024). Los resultados demostraron una relación entre la entropía de sorción y el contenido de humedad en equilibrio (Figura 5) en ambos tamaños de harina de quinua, ya que al decrecimiento del contenido de humedad en equilibrio corresponde un incremento de los valores de entropía de sorción. Así mismo, se puede notar una mayor entropía en la harina de quinua de N# 60 (250 µm) que en la N# 200 (75 µm). Los valores indican una mayor movilidad de las moléculas de agua a menores contenido de humedad y una menor movilidad a contenidos de humedad más elevada(Al-Muhtaseb et al., 2004b). Este comportamiento también fue observado en harina de cúrcuma (Siqueira-de-Lima et al., 2024), almidón (Al-Muhtaseb et al., 2004b) y granos de quinua (Arslan-Tontul, 2021).

Figura 5

Entropía de sorción de harina de quinua, tamaño N# 60 y N# 200

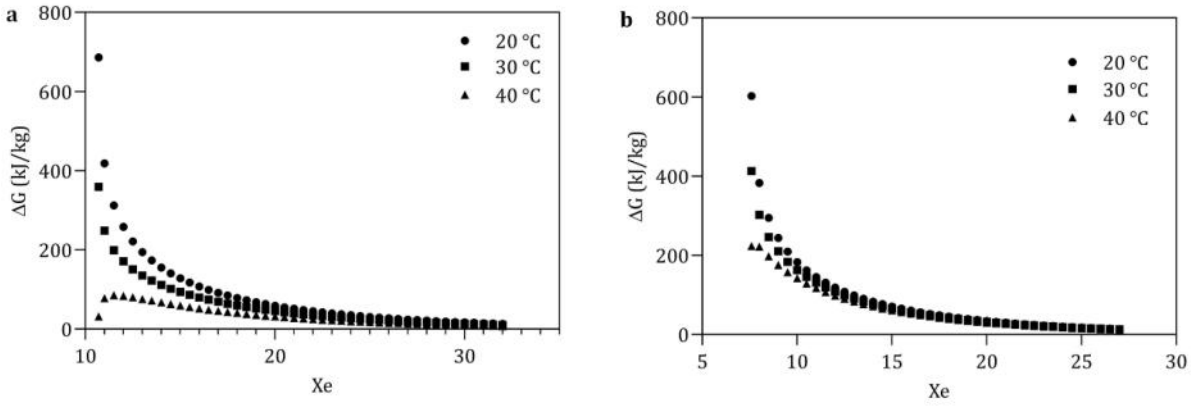


4.6.3. Energía libre de Gibbs

La variabilidad de la energía libre de Gibbs respecto al cambio de contenido de humedad en equilibrio en las temperaturas trabajadas durante el proceso de adsorción se muestra en la Figura 6. Notando un claro decrecimiento conforme el contenido de humedad en equilibrio incrementa. Valores altos de ΔG indican que existe una gran libertad de adsorción de agua debido a las propiedades hidrofílicas de un material alimentario (Yogendrarajah et al., 2015).

Figura 6

Cambios de la energía libre de Gibbs en el proceso de adsorción de harina de quinua tamaño N# 60 (a) y N# 200 (b)

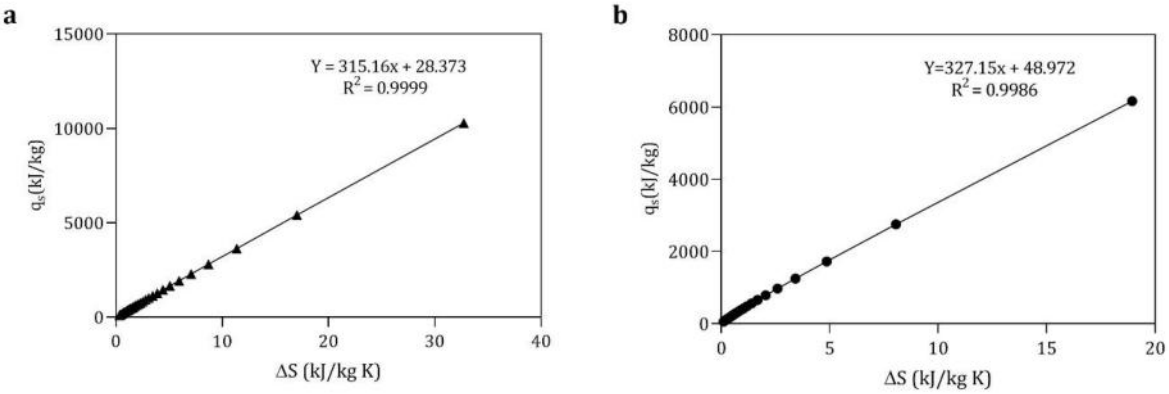


4.6.4. Teoría de compensación entalpía-entropía

La relación lineal de la teoría de compensación fue confirmada en la presente investigación (Figura 7) entre la entalpía de sorción q_s y la entropía de sorción ΔS por la diferencia hallada entre T_B y T_{hm} (tabla 9) en ambos tamaños de harina de quinua. Así mismo se encontró valores de T_{hm} menores a T_B, indicando que el proceso de adsorción es dirigido por la entalpía, tal como es reportado en harina de cúrcuma (Siqueira-de-Lima et al., 2024), en almidón de yuca (Polachini et al., 2016).

Figura 7

La relación lineal entre la entalpía y entropía de sorción de harina de quinua con tamaño N# 60 (a) y N# 200 (b)



La energía libre de Gibbs a la temperatura isocinética (T_B) hallada por le Ec. 14, indica la espontaneidad del proceso de sorción. Los valores hallados fueron 28.37 kJ/kg

(250 µm) y 48.97 kJ/kg (75 µm), demostrando que el proceso es no espontáneo (valores positivos de la energía libre de Gibbs). Uno de los factores que contribuyen a la falta de espontaneidad es el hecho de que los alimentos con alto contenido de proteína (hidrófobas) que perjudican el proceso de sorción de agua (Walstra, 2003).

Tabla 9

Teoría de compensación entalpía-entropía (teoría isocinética)

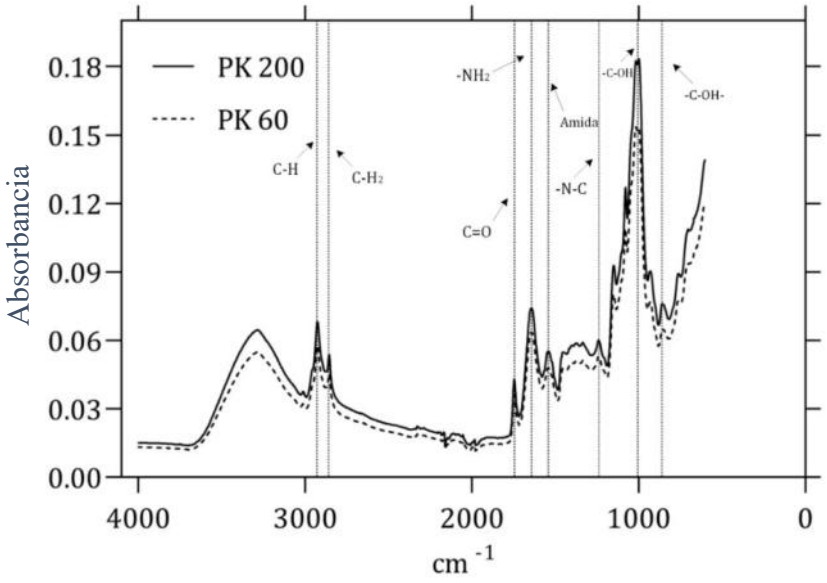
Variedad	Tamaño	Pro ceso	Temperaturas (°C)	T_{hm} (K)	T_B (K)	Variación (± K)	Control del proceso	Espon.	Se cumple teoría
Pasankalla	200 (75 µm)	Adsorción	20, 30 y 40	302.93	327.15	9.46	Entalpía	No	SI
Pasankalla	60 (250 µm)	Adsorción	20, 30 y 41	302.93	315.16	0.81	Entalpía	No	SI

4.7. Espectrofotometría Infrarroja por transformadas de Fourier.

Según los datos obtenidos, ambos tamaños mostraron similitud en las lecturas vibracionales (Figura 8), dos picos encontrados entre 2800 y 2900 cm^{-1} y dos picos entre 800-1050 cm^{-1}, son característicos de grupos de polímeros que forman parte de la estructura de los almidones (grupos -CH-, -CH_2-, C-OH y -OH) (Mousia et al., 2001). El pico encontrado entre 1750-1730 cm^{-1} corresponden al grupo C=O, esto podría ser atribuido a la presencia de ácidos carboxílicos o de grasas presentes en la harina (Contreras-Jiménez et al., 2019). Los dos picos encontrados entre 1630-150 cm^{-1}, pueden ser atribuidos a grupos Amidas (García-Salcedo et al., 2017), el pico encontrado entre 1220-1270 cm^{-1}, este asociado a los aminoácidos de las proteínas (Contreras-Jiménez et al., 2019). Los resultados encontrados fueron similares a los reportado en harina de quinua (Contreras-Jiménez et al., 2019; García-Salcedo et al., 2017).

Figura 8

Análisis vibracional (FTIR) de harina de quinua de la variedad Pasankalla (PK) tamaño N# 60 (a) y N# 200 (b)



V. CONCLUSIONES

- Se realizó el análisis de color en dos tamaños de harina de quinua Pasankalla, mostrando diferencias significativas en tonalidades rojizas (a*) y amarillas (b*) en ambos tamaños de partícula, producto al proceso de molienda y tamizado.

- La actividad de agua hallada en ambos tamaños de partícula de harina de quinua Pasankalla mostraron estar por debajo de lo requerido por el INACAL, mostrando una mayor estabilidad microbiana, reflejando un buen estado de conservación y/o almacenamiento.

- Las isotermas de adsorción de harina de quinua Pasankalla en ambos tamaños de partícula, pueden ser identificados como isotermas tipo II, y siendo el modelo de Smith modificado que mejor se ajustó al comportamiento de sorción de agua de harina de quinua.

- El análisis termodinámico mostró que, al incremento del contenido de humedad, los valores de calor isostérico de sorción y entropía de sorción decrecieron, los valores calor isostérico fueron mayores en la harina gruesa (# 60) que la fina (# 200). La energía libre de Gibbs mostro una fuerte dependencia al contenido de humedad y temperatura, mostrando una disminución de sus valores conforme el contenido de humedad y temperatura incrementaron. La teoría de compensación entalpía-entropía fue confirmada en el proceso de adsorción de ambos tamaños de partícula, llegando a la conclusión que el proceso de adsorción fue controlado por la entalpía.

- El análisis de espectroscopía infrarroja de la harina de quinua (ambos tamaños de partícula) mostró cualitativamente la presencia de almidones, ácidos carboxilos o grasas, grupos aminas y aminoácidos (presencia de proteínas).

VI. RECOMENDACIONES

- De acuerdo con el análisis termodinámico, existe una mayor facilidad de almacenamiento en harina de quinua con granulometría gruesa (# 60) ya que requiere de mayor energía para la adsorción de agua, indicando una mayor estabilidad en almacenamiento, por lo que, se recomienda su industrialización. Sin embargo, harinas finas (# 200) son usadas en procesos productos como panificación, por lo que también se recomienda su industrialización teniendo en cuenta que requiere de menor energía para adsorción de agua, siendo más susceptible al daño por microorganismos.

- Se recomienda realizar el análisis de vida útil de las harinas de quinua a partir de los datos obtenidos en la presente investigación.

- Se recomienda realizar un análisis más exhaustivo de condiciones de almacenamiento y diseño de empaques usando los datos obtenidos en harinas de quinua, para el óptimo almacenamiento, industrialización y venta.

- Se recomienda la evaluación de la influencia respecto al comportamiento de sorción y propiedades termodinámicas y vida útil de la harina de quinua en combinación con otros productos como cereales andinos

VII. REFERENCIAS

Abdullah, S., Keoh, S. C., Johar, H. M., Razak, N. A., Shaari, A. R., & Rukunudin, I. H. (2020). Mathematical modelling of moisture sorption isotherms by using BET and GAB models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *932*(1), 012037. https://doi.org/10.1088/1757-899X/932/1/012037

Acurio, L., & Ciza, D. (2021). *Isotermas de sorción en alimentos pulverulentos y ecuaciones de ajuste: Una revisión bibliográfica de datos publicados* [bachelorThesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Carrera de Ingeniería en Alimentos]. https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/33611

Aguerre, R. J., Suárez, C., & Viollaz, P. E. (1986). Enthalpy-Entropy Compensation in Sorption Phenomena: Application to the Prediction of the Effect of Temperature on Food Isotherms. *Journal of Food Science*, *51*(6), 1547-1549. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1986.tb13856.x

AktaŞ, N. (2022). Moisture Adsorption Isotherms and Adsorption Isosteric Heat of Dry Ground Meat. *Gıda*, *47*(5), 717-728. https://doi.org/10.15237/gida.GD22043

Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2004a). Water sorption isotherms of starch powders. *Journal of Food Engineering*, *61*(3), 297-307. https://doi.org/10.1016/s0260-8774(03)00133-x

Alvarado, L., Barraza, G., & Miano, A. C. (2020). Estudio de la Isoterma de Adsorción y Determinación de la Vida Útil de Harina de Quinua Malteada. *Proceedings of the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Engineering, Integration, And Alliances for A Sustainable Development" "Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on A Knowledge-Based Economy"*. The 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Engineering, Integration, And Alliances for A Sustainable Development" "Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on A Knowledge-Based Economy". https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.138

Ambreen, T., & Kim, M.-H. (2020). Influence of particle size on the effective thermal conductivity of nanofluids: A critical review. *Applied Energy*, *264*, 114684. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114684

Arocutipa, D., & Delgado, C. (2022). Evaluación de las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña (Bertholletia excelsa, H.B.K.). *Revista Biodiversidad Amazónica*, *1*(2), Article 2. https://doi.org/10.55873/rba.v1i2.201

Arslan, S. (2021). Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of quinoa grains. *Heat and Mass Transfer*, *57*(3), 543-550. https://doi.org/10.1007/s00231-020-02978-8

Arunima, S., Kumar, G., Krishnan, R., & Mohammed, T. (2021). *Colored grains: Chemistry, health benefits and processing*. *10*, 317-332. https://doi.org/10.22271/tpi.2021.v10.i5e.6233

Barbosa, G., Fontana, A., Schmidt, S., & Labuza, T. (2007). *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*. Wiley-Blackwell.

Boquet, R., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods. *International Journal of Food Science & Technology*, *13*(4), 319-327. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1978.tb00809.x

Bustos, J., Corrêa, P., Zeymer, J., Baptestini, F., & Campos, R. (2020). Moisture sorption isotherms of quinoa seeds: Thermodynamic analysis. *Oasisbr*. https://www.rcaap.pt/detail.jsp?oai:locus.ufv.br:123456789/24882

Caballero, C., Guerrero-Beltran, J., Welti-Chanes, J., Mújica Paz, H., & Torres, J. A. (2013). Moisture Sorption Isotherms of Foods: Experimental Methodology, Mathematical Analysis, and Practical Applications. In. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2578-0_15

Caiza Mañay, D. R. (2021). *Isotermas de sorción en alimentos pulverulentos y ecuaciones de ajuste: una revisión bibliográfica de datos publicados* [B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos …]. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/33611

Campos, Y., Acosta, K., & Paucar, L. M. (2022). Quinua (Chenopodium quinoa): Composición nutricional y Componentes bioactivos del grano y la hoja, e impacto

del tratamiento térmico y de la germinación. *Scientia Agropecuaria*, *13*(3), 209-220.

Cárdenas Sayritupac, E. L. (2021). *Determinación de isotermas de adsorción en aguaymanto deshidratado a tres temperaturas y su ajuste a modelos matemáticos*. https://hdl.handle.net/20.500.13028/3877

Cartagena Gordillo, Y. (2022). *Isotermas de adsorción, capacidad antioxidante y color de la harina de dos variedades de papa nativa (Solanum tuberosum)*. https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6472

Casbis, G. M., Torres, O. G. V., Rodríguez, M. A., & Nava, H. S. (2022). *Propiedades físicas y químicas de sustratos en función de su granulometría y componente orgánico-mineral*. http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/2610

Chaudhary, N., Walia, S., & Kumar, R. (2023). Functional composition, physiological effect and agronomy of future food quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): A review. *Journal of Food Composition and Analysis*, *118*, 105192. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105192

Chen, C., & Morey, R. (1989). *Comparison of Four EMC/ERH Equations*. 983-990.

Chung, D., & Pfost, H. (1967a). Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grains and Their Products Part I: Heat and Free Energy Changes od Adsorption and Desorption. *Transactions of Tha ASAE*, *10*(4), 549-552.

Chung, D., & Pfost, H. (1967b). *Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grains and Their Products Part II: A Hypothesis for Explaining the Hysteresis Effect*. https://doi.org/10.13031/2013.39728

Contreras-Jimenez, B., Torres-Vargas, O. L., & Rodriguez-Garcia, M. E. (2019). Physicochemical characterization of quinoa (Chenopodium quinoa) flour and isolated starch. *Food Chem*, *298*, 124982. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124982

Coţovanu, I., Ungureanu-Iuga, M., & Mironeasa, S. (2021). Investigation of Quinoa Seeds Fractions and Their Application in Wheat Bread Production. *Plants*, *10*(10), Article 10. https://doi.org/10.3390/plants10102150

D'Aria, F., Pagano, B., & Giancola, C. (2022). Thermodynamic properties of hydroxypropyl-β-cyclodextrin/guest interaction: A survey of recent studies. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *147*(8), 4889-4897. https://doi.org/10.1007/s10973-021-10958-1

Dussán, S., Hurtado, D. L., Camacho, J. H., Dussán, S., Hurtado-, D. L., & Camacho, J. H. (2019). Granulometría, Propiedades Funcionales y Propiedades de Color de las Harinas de Quinua y Chontaduro. *Información tecnológica*, *30*(5), 3-10. https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500003

Enríquez Ocampos, K. M. (2022). *Análisis termodinámico mediante la energía libre de GIBBS del proceso de degradación térmica de mezclas de termoplásticos*. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/20275

García-Salcedo, Á., & Torres Vargas, O. (2017). Physical-chemical characterization of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.), amaranth (Amaranthus caudatus L.), and chia (Salvia hispanica L.) flours and seeds. *Acta Agronómica*, *67*. https://doi.org/10.15446/acag.v67n2.63666

Guo, H., Hao, Y., Yang, X., Ren, G., & Richel, A. (2023). Exploration on bioactive properties of quinoa protein hydrolysate and peptides: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *63*(16), 2896-2909. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1982860

Hawa, L. C., Ubaidillah, U., Damayanti, R., & Hendrawan, Y. (2020). Moisture sorption isotherms of modified cassava flour during drying and storage. *Heat and Mass Transfer*, *56*(8), 2389-2396. https://doi.org/10.1007/s00231-020-02866-1

Hay, F. R., Rezaei, S., & Buitink, J. (2022). Seed Moisture Isotherms, Sorption Models, and Longevity. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.891913

INACAL. (2018). Norma Tecnica Peruana de Quinua. In *NTP 011.451* (I.C.S: 67.060 ed., Vol. 2da Edición, pp. 10). INACAL.

Jayas, D., & Mazza, G. (1993). *Comparison of Five, Three-parameter Equations for the Description of Adsorption Data of Oats*. https://doi.org/10.13031/2013.28322

Kyzas, G., & Lazaridis, N. (2020). *Sorption in 2020s*. BoD – Books on Demand.

Labuza, T. P., & Altunakar, B. (2020). Water Activity Prediction and Moisture Sorption Isotherms. En *Water Activity in Foods* (pp. 161-205). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781118765982.ch7

Lopez, Y. B., Roa, D. F., & Bravo, J. E. (2022). Efecto del tratamiento térmico en la estabilidad de geles obtenidos a partir de harinas de quinua. Información tecnológica, 33(1), 203-214. https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000100203

Lin, X., Shi, D., Yi, G., & Yu, D. (2024). Structural color-based physical unclonable function. *Responsive Materials*, *2*(1), e20230031. https://doi.org/10.1002/rpm.20230031

Martín□Santos, J., Vioque, M., & Gómez, R. (2012). Thermodynamic properties of moisture adsorption of whole wheat flour. Calculation of net isosteric heat. *International Journal of Food Science & Technology*, *47*. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02996.x

Martín, M. E., Raigón, M. D., García, M. D., & Albors, A. (2021). Role of Hydrocolloids in the Structure, Cooking, and Nutritional Properties of Fiber-Enriched, Fresh Egg Pasta Based on Tiger Nut Flour and Durum Wheat Semolina. *Foods*, *10*(10), Article 10. https://doi.org/10.3390/foods10102510

McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2003). Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. *Journal of Food Engineering*, *60*(2), 157-165. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00036-0

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI]. (2021). *Observatorio de las siembras y perspectivas de la producción de quinua*.

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2021). *Análisis de Mercado, Quinua 2015—2020*. MINAM.

MiraVásquez, J. M., & Sucoshañay, D. (2016). Caracterización de la harina de quinua (chenopo- dium quinoa willd.) Producida en la provincia de Chimborazo, Ecuador. *Perfiles RevistaCientífica*,*2*(18). https://perfiles.espoch.edu.ec/public/arthtml/Perfiles16/Perfiles16Art4/p1cfdbegmk15ti1888betv1v18j97.pdf

Mu, H., Xue, S., Sun, Q., Shi, J., Zhang, D., Wang, D., & Wei, J. (2023). Research Progress of Quinoa Seeds (Chenopodium quinoa Wild.): Nutritional Components, Technological Treatment, and Application. *Foods*, *12*(10), Article 10. https://doi.org/10.3390/foods12102087

Mousia, Z., Farhat, I., Pearson, M., Chesters, M., & Mitchell, J. (2001). FTIR microspectroscopy study of composition fluctuations in extruded amylopectin-gelatin blends. *Biopolymers*, *62*, 208-218. https://doi.org/10.1002/bip.1015

Nagaya, A., de Lucio, O. G., & López, L. (2024). Corrección de línea base semiautomática para espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para análisis arqueométricos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *76*(2). https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=14053322&AN=179492159&h=ohlKErHzP3CkQ0NxE3BJd5DYgAhh8rW0VWo%2FHvrAcDY0cfZj1i4zJxCHN15r7YZIuusG6%2BW26cdXFhqRmCaU9Q%3D%3D&crl=c

Nazreen, A. Z., Jai, J., Ali, S. A., & Manshor, N. M. (2020). Moisture Adsorption Isotherm Model for Edible Food Film Packaging – A Review. *Scientific Research Journal*, *17*(2), Article 2. https://doi.org/10.24191/srj.v17i2.10160

Noguera, D., & Rivero, D. (2021). Isotermas dinámicas de sorción de humedad y propiedades termodinámicas de café soluble. *Ingenieria y Región*, *25*, 32-45.

Ouaabou, R., Ennahli, S., Di Lorenzo, C., Hanine, H., Bajoub, A., Lahlali, R., Idlimam, A., Ait Oubahou, A., & Mesnaoui, M. (2021). Hygroscopic Properties of Sweet Cherry Powder: Thermodynamic Properties and Microstructural Changes. *Journal of Food Quality*, *2021*(1), 3925572. https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/3925572

Osmayo Huacan, B. M. (2023). *Propiedades termodinámicas e isotermas de sorción de agua de granos de quinua (Chenopodium quinoa).* https://repositorio.unam.edu.pe/bitstream/UNAM/502/1/D095_48412127_T.pdf

Pantoja, L., Prieto, G., & Vargas, E. A. (2020). Caracterización de la harina de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) y la harina de tarwi (Lupinus mutabilis Sweet) para

su industrialización. *TAYACAJA*, *3*(1), Article 1. https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.72

Pantoja-Tirado, L., Prieto-Rosales, G., & Vargas, E. A. (2020). Caracterización de la harina de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) y la harina de tarwi (Lupinus mutabilis Sweet) para su industrialización. *TAYACAJA*, *3*(1), Article 1. https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.72

Pathan, S., & Siddiqui, R. A. (2022). Nutritional Composition and Bioactive Components in Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) Greens: A Review. *Nutrients*, *14*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/nu14030558

Peleg, M. (2020). Models of Sigmoid Equilibrium Moisture Sorption Isotherms With and Without the Monolayer Hypothesis. *Food Engineering Reviews*, *12*(1), 1-13. https://doi.org/10.1007/s12393-019-09207-x

Polachini, T., Betiol, L., Filho, J., & telis-Romero, J. (2016). Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. *Thermochimica Acta*, *632*. https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.03.032

Pereda, J. M. (2016). *Calibración para determinar composición proximal de la quinua (Chenopodiun Quinoa W.) Usando la Espectroscopía de transmitancia en el infrarrojo cercano* Universidad Agraria la Molina]. https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/9889

Rajahmundry, G. K., Garlapati, C., Kumar, P. S., Alwi, R. S., & Vo, D.-V. N. (2021). Statistical analysis of adsorption isotherm models and its appropriate selection. *Chemosphere*, *276*, 130176. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130176

Ramirez, M. M., Cruz M.T, Victoria, M. G., Mendoza., V., & Sosa, A. (2014). Determinacion de las Isotermas de sorción y las propiedades termodinamicas de harina de maíz nixtamilizada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química.*, *Vol. 13, No. 1 (2014)* 165-178.

Ren, G., Teng, C., Fan, X., Guo, S., Zhao, G., Zhang, L., Liang, Z., & Qin, P. (2023). Nutrient composition, functional activity and industrial applications of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.). *Food Chemistry*, *410*, 135290. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135290

Ren, Y., Setia, R., Warkentin, T. D., & Ai, Y. (2021). Functionality and starch digestibility of wrinkled and round pea flours of two different particle sizes. *Food Chemistry*, *336*, 127711. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127711

Rolandelli, G., Farroni, A. E., & Buera, M. del P. (2022). Análisis de la movilidad molecular en harinas de maíz y quinua mediante RMN 1H y su relación con la distribución de agua, transición vítrea y relajación entálpica. *Food Chemistry*, *373*, 131422. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131422

Singh, P., & Heldman, D. (2014). *Introduction to Food Engineering* (5th ed.). Academic Press.

Siqueira-de-Lima, M., Cagnin, C., Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Telis-Romero, J., & Resende, O. (2024). Thermodynamic approach on water vapor sorption of *Curcuma longa* L. flour. *LWT*, *206*, 116592. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116592

Seth, D., Dash, K., Mishra, H. N., & Deka, S. (2018). Thermodynamics of sorption isotherms and storage stability of spray dried sweetened yoghurt powder. *Journal of Food Science and Technology*, *55*. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3340-6

Smith, S. (1947). *The Sorption of Water Vapor by High Polymers. Journal of American Chemical Society*. 646-651.

Sokolovskaya, O., & Valevskaya, L. (2022). Study of scorption properties of quinoa seeds. *Grain Products & Mixed Fodder's*, *22*(2), 4. https://doi.org/10.15673/gpmf.v22i2.2441

Stępień, A., Witczak, M., & Witczak, T. (2020). Moisture sorption characteristics of food powders containing freeze dried avocado, maltodextrin and inulin. *International Journal of Biological Macromolecules*, *149*, 256-261.

Stalmans, T. (2024). *Segunda ley de la termodinámica: Entropía*. https://recursoseducativos.unam.mx/handle/123456789/23541

Tao, Y., Wu, Y., Yang, J., Jiang, N., Wang, Q., Han, Y., & Zhou, J. (2017). Thermodynamic sorption properties, water plasticizing effect and particle characteristics of blueberry powders produced from juices, fruits and pomaces. *Powder Technology*, *323*. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.09.033

Tan, M., Zhao, Q., & Zhao, B. (2021). Physicochemical properties, structural characterization and biological activities of polysaccharides from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, *193*, 1635-1644. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.226

Tapia, M. S. (2020). Contribución al concepto de actividad del agua (AW) y su aplicación en la ciencia y tecnología de alimentos en latinoamérica y venezuela contribution to the concept of water activity (AW) and its application in food science and technology in latin america and venezuela. *Comisión editorial*, 18.

Tapia, M. S., Alzamora, S. M., & Chirife, J. (2020). Effects of Water Activity (a) on Microbial Stability as a Hurdle in Food Preservation. En *Water Activity in Foods* (pp. 323-355). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781118765982.ch14

Terán Chamba, M. J. (2023). *Diseño del proceso de elaboración de bolitas de maíz con queso chedar para la microempresa agus snack*. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/21844

Thompson, T., Peart, R., & Foster, G. (1968). *Mathematical Simulation of Corn Drying—A New Model*. https://doi.org/10.13031/2013.39473

Urbina Dicao, K. S., Santacruz Terán, S. G., Guapi Álava, G. M., Revilla Escobar, K. Y., & Aldas Morejon, J. P. (2023). Caracterización fisicoquímica de los cereales y funcionalidad de las harinas de amaranto (Amaranthus caudatus) y quinoa (Chenopodium quinoa). *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, *10*(2), 33-41.

Walstra, P. (2002). *Physical Chemistry of Foods*. CRC Press.

Needs. In C. Wrigley, I. Batey, & D. Miskelly (Eds.), *Cereal Grains (Second Edition)* (pp. 27-40). Woodhead Publishing. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081007198000024

Witczak, T., & Gałkowska, D. (2021). Sorption and thermal characteristics of ancient grain pasta of various compositions. *LWT*, *137*, 110433. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110433

Yi, C. Y., & Wang, M. (2021). The functional ingredients of quinoa (Chenopodium quinoa) and physiological effects of consuming quinoa: A review. *Food Frontiers*, *2*(3), 329-356. https://doi.org/10.1002/fft2.109

Yogendrarajah, P., Samapundo, S., Devlieghere, F., De Saeger, S., & De Meulenaer, B. (2015). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of whole black peppercorns (Piper nigrum L.). *LWT - Food Science and Technology*, *64*(1), 177-188. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.045

Zeymer, J. (2017). *Equilíbrio higroscópico e análise termodinámica da sorçao de água em graos de arroz em casca*. Universidade Federal de Viçosa.

Zhang, Z., Li, X., Jia, H., & Liu, Y. (2022). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of tiger nuts: An oil-rich tuber. *LWT*, *167*, 113866. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113866

Z. MOUSIA, I. A. F., M. PEARSON, M. A. CHESTERS, J. R. MITCHELL. (2001). FTIR Microspectroscopy Study of Composition Fluctuations in Extruded Amylopectin–Gelatin Blends. *CT96-5073. Biopolymers (Biospectroscopy), Vol. 62, 208–218 (2001) © 2001 John Wiley & Sons, Inc*, 11. (2 Department of Physical Chemistry, School of Chemistry, University Park, University of Nottingham, Nottingham

VIII. ANEXOS

ANEXO A.

Datos de picos de absorbancia reportados en el análisis de propiedades funcionales de harina de quinua

N° de Onda	#200			#60		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
2924	0.0772	0.0063	0.0647	0.0637	0.0547	0.0549
2854	0.0606	0.0495	0.051	0.0506	0.0428	0.0433
1744	0.0488	0.0392	0.0405	0.0399	0.0345	0.0339
1642	0.0799	0.0711	0.0713	0.0672	0.0605	0.0629
1538	0.0599	0.0527	0.0531	0.0219	0.0452	0.0468
1238	0.0655	0.057	0.0581	0.0585	0.0499	0.0509
998	0.1971	0.174	0.1787	0.1569	0.1449	0.1567
856	0.082	0.072	0.0744	0.0687	0.0618	0.0648

ANEXO B.

Promedio de datos de isotermas de adsorción de harina de quinua Harina de quinua en tamiz #200 (contenido de humedad en % de base seca)

Aw	Temperatura (°C)		
	20	**30**	**40**
0.1	8.74		
0.2	9.52	8.475	7.83
0.3	10.6	9.77	8.77
0.4	11.69	11.085	10.39
0.5	13.05	12.8	12.4
0.6	15.12	14.165	14.27
0.7	17.26	16.915	16.21
0.8	19.71		

ANEXO C.

Harina de quinua en tamiz #60 (contenido de humedad en % de base seca)

Aw	Temperatura (°C)		
	20	**30**	**40**
0.1	11.37	8.445	6.09
0.2	13	10.13	7.82
0.3	13.82	11.325	9
0.4	15.32	12.505	10.15
0.5	16.56	14.34	11.65
0.6	18.79	16.51	13.94
0.7	21.82	18.735	16.29
0.8	25.64	22.305	19.69

ANEXO D

Resultados para colorimetría TAMAÑO N# 200 Y N# 60

Harina de Quinua	**L***	**a***	**b***	**c***	**h**
Pasankalla 200 A	75	4.4	13.1	13.8192	0.0519
Pasankalla 200 B	74.9	4.5	13.1	13.8514	0.0508
Pasankalla 200 C	77.1	4.5	13.6	14.3252	0.0527
Pasankalla 60 A	72.6	5	12.7	13.6488	0.0443
Pasankalla 60 B	72.6	5	12.7	13.6488	0.0443
Pasankalla 60 C	72.3	5.1	12.8	13.7786	0.0438

ANEXO E

Granulometría de harinas de Quinua en %

Tamiz	Promedio	Desviación
# 60 (250 µm)	23.69%	2.31%
# 200 (75 µm)	22.10%	1.62%
# 60 (250 µm)	26.84%	1.80%
# 200 (75 µm)	13.66%	1.87%
# 60 (250 µm)	26.93%	1.96%
# 200 (75 µm)	13.53%	1.28%

Nota. Se realizo la clasificación granulométrica con tres repeticiones

ANEXO F

Análisis Estadístico de Color en L

Parámetro L	***Tamaño 200***	***Tamaño 60***
Media	75.67	72.5
varianza	1.54	0.03
valor critico t	6.06	
Gl	2.008	
p - valor	0.025	
análisis	hay diferencias	

Análisis Estadístico de Color en a*

Parámetro a*	***Tamaño 200***	***Tamaño 60***
Media	4.47	5.03
varianza	0.0025	0.000833
valor critico t	-10.64	
Gl	4	
p - valor	0.001	
Análisis	hay diferencias	

Análisis Estadístico de Color en b*

Parámetro b*	***Tamaño 200***	***Tamaño 60***
Media	13.26	12.73
varianza	0.029	0.00233
valor critico t	3.18	
Gl	2	
p - valor	0.088	
Análisis	no hay diferencias	

ANEXO G

Análisis de Propiedades termodinámicas de tamaño N# 60

Xe	qs (kJ/kg)	QL (kJ/kg)	Intersec.	Sd (kJ/kgK)	Qs (mullet)	error	Obs-Pre)/Obs	Qs(tsami)	error
10.7	10281.4451	12711.9451	70.8452531	32.730507	6260.38755	6451.55753	0.5075193	4951.60061	7760.34446
11	5412.49671	7842.99671	36.8716492	17.0347019	5993.23031	1849.7664	0.23584944	4820.24973	3022.74698
11.5	3640.20938	6070.70938	24.5701361	11.3514029	5588.73537	481.974011	0.07939336	4616.36243	1454.34695
12	2811.69253	5242.19253	18.8535499	8.71034003	5230.1648	12.0277312	0.00229441	4429.87027	812.322258
12.5	2295.27191	4725.77191	15.3091478	7.07282628	4912.30458	186.532667	0.03947136	4259.28914	466.482767
13	1933.34045	4363.84045	12.8370512	5.93071764	4630.53265	266.692194	0.0611141	4103.26155	260.578898
13.5	1662.39265	4092.89265	10.9946652	5.07953533	4380.75172	287.859072	0.07033145	3960.54584	132.346812
14	1450.66876	3881.16876	9.56098199	4.41717368	4159.3297	278.160936	0.07166937	3830.00625	51.1625055
14.5	1280.12107	3710.62107	8.410622	3.88570736	3963.04684	252.425773	0.0680279	3710.60397	0.0170967
15	1139.57897	3570.07897	7.46611963	3.44934727	3789.04898	218.970015	0.06133478	3601.38879	31.3098184
15.5	1021.68946	3452.18946	6.67657804	3.08457905	3634.80599	182.616527	0.05289876	3501.49156	49.3020975
16	921.381392	3351.88139	6.00696207	2.77521648	3498.07499	146.193597	0.04361538	3410.11731	58.2359144
16.5	835.026696	3265.5267	5.43225546	2.50970202	3376.86776	111.341059	0.0340959	3326.53887	61.012173
17	759.951623	3190.45162	4.93405871	2.27953512	3269.4218	78.9701747	0.02475204	3250.09113	59.6395065
17.5	694.136791	3124.63679	4.49850328	2.07830852	3174.17473	49.5379366	0.01585398	3180.16571	55.5289235
18	636.025212	3066.52521	4.11491792	1.90109208	3089.74154	23.2163307	0.00757089	3116.20616	49.6809439
18.5	584.395032	3014.89503	3.77494535	1.74402475	3014.89449	0.00054322	1.8018E-07	3057.70346	42.8084314
19	538.272623	2968.77262	3.4719398	1.60403619	2948.5452	20.2274215	0.0068134	3004.19207	35.4194463
19.5	496.871715	2927.37171	3.2005453	1.47865193	2889.72889	37.6428267	0.01285892	2955.24613	27.8744162
20	459.549792	2890.04979	2.95639415	1.3658541	2837.59029	52.4595013	0.01815176	2910.47613	20.4263425
20.5	425.776264	2856.27626	2.73588687	1.26397973	2791.37125	64.9050105	0.02272365	2869.5258	13.2495346
21	395.108821	2825.60882	2.53602896	1.17164538	2750.3997	75.209121	0.02661696	2832.06924	6.46042019
21.5	367.175593	2797.67559	2.35430796	1.08769028	2714.07986	83.5957379	0.02988043	2797.80838	0.13278724

22	341.661519	2772.16152	2.18859951	1.01113297	2681.88359	90.2779306	0.0325659	2766.47057	5.69094972
22.5	318.29778	2748.79778	2.0370947	0.94113775	2653.34273	95.4550523	0.03472611	2737.80642	10.9913604
23	296.853537	2727.35354	1.89824328	0.8769884	2628.04226	99.3112815	0.03641306	2711.58782	15.7657162
23.5	277.129392	2707.62939	1.77070876	0.81806745	2605.61428	102.015116	0.03767691	2687.60613	20.0232653
24	258.952161	2689.45216	1.65333264	0.76383968	2585.73266	103.719502	0.03856529	2665.67049	23.7816714
24.5	242.17067	2672.67067	1.5451056	0.71383879	2568.1083	104.562367	0.0391228	2645.60634	27.0643262
25	226.652344	2657.15234	1.44514416	0.6676566	2552.48493	104.667413	0.03939082	2627.25402	29.8983236
25.5	212.280408	2642.78041	1.35267161	0.62493428	2538.63536	104.145048	0.03940738	2610.46747	32.3129372
26	198.951588	2629.45159	1.2670023	0.58535506	2526.3582	103.093387	0.03920718	2595.11311	34.3384821
26.5	186.574208	2617.07421	1.18752866	0.54863824	2515.47493	101.599277	0.0388217	2581.06874	36.0054718
27	175.066596	2605.5666	1.11371042	0.51453421	2505.82729	99.7393028	0.03827931	2568.2226	37.344
27.5	164.355753	2594.85575	1.04506549	0.48282026	2497.275	97.5807519	0.03760546	2556.47246	38.3832975
28	154.376229	2584.87623	0.98116239	0.45329702	2489.6937	95.1825343	0.03682286	2545.72481	39.1514216
28.5	145.06917	2575.56917	0.92161376	0.42578556	2482.97313	92.5960371	0.03595168	2535.89412	39.6750487
29	136.381508	2566.88151	0.86607091	0.40012476	2477.01559	89.8659176	0.03500976	2526.90216	39.9793441
29.5	128.26527	2558.76527	0.81421912	0.37616923	2471.73444	87.0308316	0.03401282	2518.67738	40.0878924
30	120.676981	2551.17698	0.76577361	0.35378741	2467.05288	84.1240983	0.03297462	2511.15431	40.0226718
30.5	113.577152	2544.07715	0.72047613	0.33285997	2462.90285	81.174305	0.03190717	2504.27309	39.8040631
31	106.929839	2537.42984	0.67809192	0.31327847	2459.22399	78.2058528	0.03082089	2497.97896	39.450882
31.5	100.702256	2531.20226	0.63840718	0.29494412	2455.96281	75.2394496	0.02972479	2492.22182	38.9804306
32	94.8644363	2525.36444	0.60122677	0.27776677	2453.07188	72.2925526	0.02862658	2486.95588	38.4085599

Análisis de Propiedades termodinámicas de tamaño N# 60

Xe	qs (kJ/kg)	QL (kJ/kg)	intersec.	Sd (kJ/kgK)	Qs (mullet)	error	Obs-Pre)/Obs	Qs(tsami)	error
7.6	6155.84472	8586.34472	41.0030962	18.9434304	4861.86908	3724.47564	0.43376731	6057.29262	2529.0521
8	2744.25895	5174.75895	17.4336482	8.05434548	4514.51868	660.24027	0.1275886	5182.11927	7.36031825
8.5	1718.76029	4149.26029	10.5133867	4.85718466	4149.25908	0.0012067	2.9082E-07	4373.36464	224.10435
9	1246.55779	3677.05779	7.39916742	3.41841535	3848.01742	170.95963	0.04649359	3798.47447	121.416678
9.5	968.750226	3399.25023	5.60528927	2.58964364	3599.57346	200.323236	0.05893159	3391.28573	7.96449967
10	784.609748	3215.10975	4.43968172	2.05113296	3394.67352	179.563774	0.05584997	3103.78626	111.323486
10.5	653.349054	3083.84905	3.6243694	1.67445866	3225.68577	141.836714	0.0459934	2901.36113	182.487929
11	555.032278	2985.53228	3.02459391	1.39736238	3086.31598	100.783705	0.03375737	2759.19092	226.341354
11.5	478.686443	2909.18644	2.56679414	1.18585889	2971.37312	62.1866722	0.02137597	2659.56322	249.623219
12	417.749027	2848.24903	2.2073422	1.0197921	2876.57593	28.3269062	0.00994538	2589.88877	258.360255
12.5	368.045028	2798.54503	1.91871554	0.88644658	2798.39356	0.15146331	5.4122E-05	2541.25137	257.293655
13	326.7877	2757.2877	1.68269872	0.77740681	2733.91398	23.3737182	0.00847707	2507.35595	249.931752
13.5	292.043919	2722.54392	1.48676372	0.68688484	2680.73554	41.8083812	0.01535637	2483.77032	238.773596
14	262.429623	2692.92962	1.3220178	0.61077222	2636.87752	56.0521051	0.02081455	2467.38167	225.547958
14.5	236.927273	2667.42727	1.18197964	0.54607459	2600.70636	66.7209126	0.02501321	2456.00862	211.418653
15	214.771755	2645.27176	1.06181813	0.49055998	2570.87481	74.3969451	0.0281245	2448.12565	197.146109
15.5	195.376499	2625.8765	0.95786184	0.44253217	2546.27175	79.6047534	0.0303155	2442.66781	183.208694
16	178.284145	2608.78415	0.86727321	0.40068022	2525.98078	82.8033609	0.03174021	2438.89293	169.89122
16.5	163.132752	2593.63275	0.78782645	0.36397582	2509.24616	84.386594	0.03253606	2436.28457	157.348184
17	149.632091	2580.13209	0.71775248	0.33160165	2495.44456	84.6875312	0.03282294	2434.48387	145.648217
17.5	137.546683	2568.04668	0.6556287	0.30290046	2484.06192	83.9847587	0.03270375	2433.2418	134.804883
18	126.68345	2557.18345	0.60029894	0.27733811	2474.67429	82.5091607	0.03226564	2432.38573	124.797723
18.5	116.882556	2547.38256	0.55081458	0.25447633	2466.932	80.4505601	0.03158166	2431.79614	115.58642
19	108.010538	2538.51054	0.5063905	0.23395241	2460.54667	77.9638669	0.03071245	2431.39036	107.120179

19.5	99.9550684	2530.45507	0.46637176	0.21546375	2455.28048	75.1745855	0.02970793	2431.11128	99.3437934
20	92.6209229	2523.12092	0.43020802	0.1987561	2450.93728	72.1836397	0.02860887	2430.91945	92.2014764
20.5	85.9268394	2516.42684	0.39743372	0.18361438	2447.3553	69.0715365	0.02744826	2430.78767	85.639168
21	79.8030441	2510.30304	0.3676526	0.1698555	2444.40113	65.9019188	0.02625257	2430.6972	79.6058438
21.5	74.1892882	2504.68929	0.34052546	0.15732276	2441.96472	62.7245707	0.02504285	2430.63512	74.0541683
22	69.0332734	2499.53327	0.31576037	0.14588129	2439.95533	59.577942	0.02383563	2430.59254	68.9407311
22.5	64.289382	2494.78938	0.29310483	0.13541443	2438.29812	56.4912577	0.0226437	2430.56335	64.2260272
23	59.9176422	2490.41764	0.27233948	0.12582084	2436.93137	53.4862714	0.02147683	2430.54336	59.8742865
23.5	55.8828811	2486.38288	0.25327286	0.11701206	2435.80416	50.578717	0.02034229	2430.52966	55.8532228
24	52.1540261	2482.65403	0.23573722	0.10891059	2434.87452	47.7795067	0.01924533	2430.52028	52.1337453
24.5	48.7035253	2479.20353	0.21958501	0.10144827	2434.10781	45.0957146	0.0181896	2430.51386	48.6896618
25	45.506864	2476.00686	0.20468598	0.09456492	2433.47548	42.5313833	0.01717741	2430.50947	45.4973904
25.5	42.5421587	2473.04216	0.19092477	0.08820724	2432.95398	40.0881814	0.01621007	2430.50647	42.535687
26	39.7898153	2470.28982	0.17819885	0.08232787	2432.52388	37.7659391	0.01528806	2430.50442	39.7853957
26.5	37.2322391	2467.73224	0.16641687	0.07688459	2432.16916	35.5630815	0.01441124	2430.50302	37.2292218
27	34.8535881	2465.35359	0.15549715	0.07183968	2431.87661	33.4769787	0.01357898	2430.50206	34.8515288

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua, de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 041-2022-UNAM que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos : Jorge Fernando Pantigoso Canahuire
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N° : 46044477
Correo electrónico : jorgepantigoso891104@gmail.com
Teléfono/Celular : 989046200

2. GRADO, TITULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

a) Articulo ( )
b) Tesis de pregrado (X)
c) Tesis de Maestría ( )
d) Tesis de Doctorado ( )
e) Monografía ( )
f) Reporte de caso científico o hallazgos ( )
g) Libro ( )
h) Parte de un libro ( )
i) Revisión ( )
j) Conferencia ( )
k) Presentación ( )
l) Artículo preliminar ( )
m) Articulo antes de ser publicado ( )
n) Artículo de prensa ( )
o) Documentos internos ( )
p) Imagen ( )
q) Documentos técnicos ( )
r) Ponencias presentadas en eventos científicos (Jornada, Congreso, Simposio Conferencias, etc.) ( )
s) Informes de suficiencia profesional ( )
t) Patentes producidas por académicos/as ( )

4. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Marque con una X)

a) Tesis (X)
b) Trabajo de Investigación ( )
c) Trabajo de suficiencia profesional ( )
d) Trabajo académico ( )

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título : Isotermas de Sorción de Agua de Harina de Quinua: Análisis Termodinámico
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : 2.11.00
c) Fecha de publicación : 31/01/2025

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : Shony mayta Hancco
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 01325181
c) ORCID : 0000-0002-5014-4681

FIRMA :

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 46044472
NOMBRES Y APELLIDOS : Jorge Fernando Pantigoso Canahuire

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

Con la autorización de depósito da mi trabajo de investigación, otorgo a la Universidad Nacional de Moquegua, una Licencia No Exclusiva para reproducir. distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAM, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias, y libre de remuneraciones.

En virtud de dicha Licencia, la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA, podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con los propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.

La UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA consignara el nombre del/los autor/es del trabajo de investigación, y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).

(X) **SI autorizo que se deposite inmediatamente.**

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 46044477

NOMBRES Y APELLIDOS : Jorge Fernando Pantigoso Canahuire

FECHA : 31/01/2025



DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN / TESIS / TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Yo, Jorge Fernando Pantigoso Canahuire,
bachiller de la Escuela Profesional de: Ingeniería Agroindustrial
,
de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado(a) con DNI Nº. 46044472, autor(a) del Trabajo de Investigación / Tesis / Trabajo de suficiencia profesional, denominado:
"Isotermas de Sorción de Agua de Harina de Quinua: Análisis termodinámico"

Declaro bajo juramento que:

1. El trabajo de investigación es auténtico, siendo resultado de mi trabajo personal, que no se ha copiado, que no se ha utilizado ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor. Por tanto, el trabajo de investigación no ha sido plagiado total ni parcialmente.
2. El trabajo de investigación no ha sido autoplagiada, es decir, no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
3. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados y por tanto los resultados que se presentan en el trabajo de investigación constituirán aporte a la realidad investigada.

Soy consciente de que, el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el trabajo de investigación, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Moquegua, 31/01/2025



Huella digital

Nombres y Apellidos: Jorge Fernando Pantigoso Canahuire
DNI: 46044472

Jorge Fernando Pantigoso Canahuire

ISOTERMAS DE SORCIÓN DE AGUA DE HARINA DE QUINUA: ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:437073017

Fecha de entrega
6 mar 2025, 6:34 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
6 mar 2025, 6:54 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
Informe de Tesis_Jorge Pantigoso.docx

Tamaño de archivo
970.3 KB

62 Páginas

15,046 Palabras

80,037 Caracteres

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)
- Trabajos entregados

Fuentes principales

13% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

13% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.unam.edu.pe 4%
2	Internet	1library.co 1%
3	Internet	www.coursehero.com <1%
4	Internet	riunet.upv.es <1%
5	Internet	hdl.handle.net <1%
6	Internet	literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080 <1%
7	Internet	repositorio.uns.edu.pe <1%
8	Internet	e-catalog.nlb.by <1%
9	Internet	repositorio.utm.edu.ec:3000 <1%
10	Internet	unam.edu.pe <1%
11	Internet	www.researchgate.net <1%

12	Internet	
prod.eldestapeweb.com		<1%
13	Internet	
repositorio.umsa.bo		<1%
14	Internet	
sedici.unlp.edu.ar		<1%
15	Publicación	
A. M. Ordoñez-Silva, A. Campos-Cerquera, Gentil Andrés Collazos-Escobar, Nelson ...		<1%
16	Internet	
rid.unam.edu.ar		<1%
17	Internet	
bdigital.unal.edu.co		<1%
18	Internet	
pt.scribd.com		<1%
19	Internet	
alicia.concytec.gob.pe		<1%
20	Internet	
es.slideshare.net		<1%
21	Internet	
www.clubensayos.com		<1%
22	Internet	
repositorio.unal.edu.co		<1%
23	Internet	
pure.udem.edu.mx		<1%
24	Publicación	
Diego Fernando Noguera Córdoba, Diana Marsela Rivero Barrios. "Isotermas diná...		<1%
25	Publicación	
Jose Vicente Garcia Perez. "Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonido...		<1%

26	Internet	
ruc.udc.es		<1%
27	Internet	
www.repositorio.unam.edu.pe		<1%
28	Internet	
www.slideshare.net		<1%
29	Internet	
agris.fao.org		<1%
30	Internet	
tesis.usat.edu.pe		<1%
31	Internet	
www.grafiati.com		<1%
32	Internet	
ri.uaemex.mx		<1%
33	Internet	
prezi.com		<1%
34	Publicación	
Felícitas Hevia H., Rosemarie Wilckens E., Marisol Berti D., Ricardo Badilla B.. "CAR...		<1%
35	Internet	
bibliotecasemiaridos.ufv.br		<1%
36	Internet	
core.ac.uk		<1%
37	Internet	
repositorio.unach.edu.pe		<1%
38	Internet	
repositorio.unajma.edu.pe		<1%
39	Internet	
repositorio.unsch.edu.pe		<1%

40	Internet	
www.planetatareas.com		<1%
41	Internet	
americanae.aecid.es		<1%
42	Internet	
repositorio.upeu.edu.pe		<1%
43	Internet	
zdocs.mx		<1%
44	Internet	
biblio12.mdp.edu.ar		<1%
45	Internet	
espameteo.webcindario.com		<1%
46	Internet	
gredos.usal.es		<1%
47	Internet	
japanese.longdom.org		<1%
48	Internet	
www.foodandnutritionjournal.org		<1%
49	Internet	
Jose Velazquez Varela. "ESTUDIO DE LOS ESPECTROS DIELECTRICOS EN ALIMENTO...		<1%
50	Internet	
addi.ehu.es		<1%
51	Internet	
documents.mx		<1%
52	Internet	
rehue.csociales.uchile.cl		<1%
53	Internet	
repositorio.uigv.edu.pe		<1%

54 Internet

repositorio.unfv.edu.pe:8080 <1%

55 Internet

riaa.uaem.mx:8080 <1%

56 Internet

www.johnsoncontrols.es <1%

57 Internet

www.tandfonline.com <1%

58 Internet

www.tdx.cat <1%

59 Internet

www.upo.es <1%

DECENIO DE LA IGUALDAD DE OPORTUNIDADES PARA MUJERES Y HOMBRES
"AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA"

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO N° 137-2025-CU-UNAM

Moquegua, 20 de marzo de 2025

VISTOS:

El Acuerdo de Sesión Ordinaria de Consejo Universitario de fecha 19 de marzo de 2025; Proveído N° 871-2025 de fecha 14 de marzo de 2025 emitido por el Rectorado; Informe N° 125-2025-UNAM-R/SG de fecha 14 de marzo de 2025 emitido por la Secretaría General; Carta N° 57-2025-UNAM/SEGE/GYT/SVR con fecha de recepción 14 de marzo de 2025 emitido por el Área de Grados y Títulos; Sobre el otorgamiento del Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial, y;

CONSIDERANDO:

Que, la Constitución Política del Perú en su artículo 18° prevé que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico, y el artículo 8° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y las Leyes de la República e implica las organizaciones de su sistema académico, económico y administrativo, así como la administración de sus bienes y rentas, elaborar su presupuesto y aplicar sus fondos con la responsabilidad que impone la Ley;

Que, el artículo 58° de la Ley Universitaria, Ley N° 30220, concordado con el artículo 14° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado con Resolución de Comisión Organizadora N° 578-2021-UNAM, establecen que el **Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la universidad;**

Que, el artículo 44° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, señala que las universidades otorgan los grados académicos de Bachiller, Maestro, Doctor y los Títulos Profesionales que correspondan, a nombre de la Nación (...);

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, precisa **los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis o trabajo de suficiencia profesional**. Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

Que, con Resolución de Comisión Organizadora N° 1153-2021-UNAM, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, el mismo que fue modificado a través de las Resoluciones de Comisión Organizadora N° 410, 453 y 890-2022; N° 880-2023 y N° 081, 484-2024-UNAM/CO, el cual establece los requisitos y norma los procedimientos para la obtención de los grados académicos y títulos profesionales conferidos por esta Casa Superior de Estudios;

Que, mediante Carta N°057-2025-UNAM/SEGE/GYT/SVR, con fecha de recepción 14 de marzo de 2025, el Área de Grados y Títulos, remite a Secretaria General, el expediente de un (1) bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, quien se encuentra apto para la expedición del Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial por la modalidad de sustentación de Tesis, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios[1], exigidos en el

[1] Artículo 122°. - Requisitos para la obtención del Título Profesional
Para obtener el Título Profesional el interesado deberá presentar ante su Escuela Profesional un expediente con la siguiente documentación:
a. Solicitud dirigida al Director de la Escuela Profesional o quien haga sus veces, indicando la fecha y número de comprobante de pago.
b. Dos (2) fotografías de frente, tamaño pasaporte a color con fondo blanco (con traje formal); para garantizar la seguridad ciudadana.
c. Dos ejemplares de la Tesis, del Trabajo de Suficiencia Profesional o Informe del Examen Profesional en físico, uno para la Biblioteca y otro para la Escuela Profesional, y un CD con la versión digital.
d. Formulario de autorización del graduado para la publicación de la Tesis, Trabajo de Suficiencia Profesional o Informe de Examen Profesional en el repositorio.
e. Declaración Jurada de originalidad de la Tesis, Trabajo de Suficiencia Profesional o Informe de Examen Profesional.
La Escuela Profesional es responsable de completar el expediente del bachiller en un plazo máximo de 3 días hábiles y derivar a la Oficina de Secretaría General, adjuntando los siguientes documentos:
a. Copia del acta de sustentación indicando la modalidad de obtención del título profesional.

Domicilio Fiscal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme lo señala la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, razón por la cual la Secretaría General incluye el expediente como punto de agenda para ser tratado en Sesión de Consejo Universitario de fecha 19 de marzo de 2025;

Que, se ha establecido como atribución del Consejo Universitario de la UNAM, la facultad de conferir los grados académicos y los títulos profesionales (...), por lo que en mérito al pedido del Secretario General y debatido el caso en Sesión Ordinaria de fecha 19 de marzo de 2025, se acordó por unanimidad **conferir a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial a un (1) bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua;**

De conformidad con el artículo 59° de la Ley Universitaria, Ley N° 30220, concordado con el artículo 16° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, y estando a lo acordado en la Sesión Ordinaria de fecha 19 de marzo de 2025 de Consejo Universitario;

SE RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO: CONFERIR, a nombre de la Nación el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL** por la modalidad de Sustentación de Tesis, al Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua, de acuerdo al siguiente detalle:

1. **JORGE FERNANDO PANTIGOSO CANAHUIRE**

   TESIS : "ISOTERMAS DE SORCIÓN DE AGUA DE HARINA DE QUINUA: ANÁLISIS TERMODINÁMICO", cuyo Asesor fue el Dr. Jhony Mayta Ancco.

ARTÍCULO SEGUNDO: AUTORIZAR, a la Secretaría General de la Universidad Nacional de Moquegua, expedir y registrar el Diploma correspondiente para su otorgamiento.

ARTÍCULO TERCERO: ENCARGAR al Área de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, para que realice las acciones pertinentes conducentes, relacionadas con la inscripción de los grados y títulos en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.

ARTÍCULO CUARTO: NOTIFICAR, la presente Resolución a las instancias y dependencias administrativas y académicas de la Universidad Nacional de Moquegua, para su conocimiento, cumplimiento y demás fines pertinentes.

ARTÍCULO QUINTO: ENCARGAR, a la Oficina de Tecnología de la Información, la publicación de la presente Resolución en el portal de transparencia de la Universidad Nacional de Moquegua.

REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE, CÚMPLASE Y ARCHÍVESE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA – UNAM RECTORADO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
Rector
Universidad Nacional de Moquegua

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA – UNAM SECRETARÍA GENERAL

ABG. GUILLERMO S. KUONG CORNEJO
Secretario General
Universidad Nacional de Moquegua

b. Constancia de "no adeudo" de Bienes a la Universidad, bienes a los Laboratorios Básicos y de Especialidad, material bibliográfico; dichos documentos deberán ser refrendados por los responsables a cargo.