

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN  
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**



**TESIS**

**“Predicción de vida útil de harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) a partir de isoterma de adsorción de agua para diferentes modelos matemáticos”**

PRESENTADO POR:

**Yuliana Juana, YUPANQUI CALLE**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

ASESOR:

**Dr. Alberto Luis, HUAMANI HUAMANI**

AYACUCHO - PERÚ

2023

## **DEDICATORIA**

*A Dios porque está conmigo en cada paso que doy, por ser guía constante y fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y darme la fortaleza necesaria para superar cada uno de los obstáculos; por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.*

*Para mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi mejor apoyo en todo momento; depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. A mis hermanos que me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.*

## AGRADECIMIENTO

*A Dios, de quien he recibido el más hermoso tesoro que existe: la vida quien me ha enseñado el significado del amor, la fe y de la vida sobrenatural. Quien ha iluminado mi camino y llenado de esperanza, paz, amor y alegría a mi vida.*

*A mis padres, quienes han estado a mi lado en las buenas y en las malas, han creído en mí y han dado un valor especial a mi vida. De quienes he recibido todo el amor que he requerido y has depositado en mi la semilla que me forjado hasta lo que soy.*

*A mis hermanos, de quienes he recibido todo el apoyo que he necesitado y quienes me han enseñado con su ejemplo de vida grandes lecciones que me han ayudado a forjar mi vida.*

*A mi asesor, por forjar en mí el conocimiento que me han llevado a la realización de esta tesis, de quien he recibido consejos, y quien me proporciono todo el apoyo, la tolerancia y la paciencia para lograr llegar al final de mi camino profesional.*

*Mi gratitud, a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, fuente de sabiduría y enseñanza, forjado de anhelos y sueños, por acogernos en sus aulas y brindarnos la formación profesional.*

*A toda la plana docente de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, en especial a los docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias, por sus enseñanzas y orientaciones durante nuestra permanencia en las aulas universitarias.*

## RESUMEN

El objetivo fue predecir de vida útil de harina de amaranto cocido por torreado; como una función de la variación de humedad reflejado por su isoterma de estabilidad para diferentes modelos matemáticos. Los objetivos específicos fueron: (1) Determinar las propiedades físicas de la harina de amaranto cocido; (2) Determinar las propiedades funcionales de Índice de adsorción de agua (WAI), índice de solubilidad en agua (WSI) y poder de hinchamiento (SP) de la harina de amaranto cocido. (3) Determinar la isoterma de estabilidad de la harina cocida de amaranto usando diferentes modelos matemáticos como GAB, Oswin, Henderson y Caurie. (4) Estimar la vida útil de harina de amaranto cocido usando diferentes modelos matemáticos de las isotermas de estabilidad de humedad. (5) Determinar el cambio químico de la harina de amaranto cocido (índice de peróxido). La metodología usada fue, primero determinar la humedad de equilibrio de la harina de amaranto cocido para luego con dicha información determinar los parámetros de los modelos matemáticos de GAB, Oswin, Henderson y Caurie para la simulación de las isotermas de estabilidad. Con la información de los parámetros de los modelos matemáticos se determinó la vida útil a través de la simulación, para ello se usó los métodos numéricos de integración de Simpson tres octavos y ecuaciones diferenciales ordinarias de Runge-Kutta de cuarto orden. Como resultado se obtuvo una vida útil del amaranto de 322 a 358 días empacadas en empaque de Doy Pack.

**Palabra clave:** vida útil, amaranto, isoterma

## ABSTRACT

The objective was to predict the useful life of amaranth flour cooked by roasting; as a function of the humidity variation reflected by its stability isotherm for different mathematical models. The specific objectives were: (1) Determine the physical properties of cooked amaranth flour; (2) Determine the functional properties of Water Adsorption Index (WAI), Water Solubility Index (WSI) and Swelling Power (SP) of cooked amaranth flour. (3) Determine the stability isotherm of cooked amaranth flour using different mathematical models such as GAB, Oswin, Henderson and Caurie. (4) Estimate the shelf life of cooked amaranth flour using different mathematical models of the moisture stability isotherms. (5) Determine the chemical change of cooked amaranth flour (peroxide value). The methodology used was, firstly, to determine the equilibrium humidity of the cooked amaranth flour, and then with said information, determine the parameters of the GAB, Oswin, Henderson and Caurie mathematical models for the simulation of the stability isotherms. With the information of the parameters of the mathematical models, the useful life was determined through the simulation, for this the numerical methods of integration of Simpson three eighths and ordinary differential equations of Runge-Kutta of fourth order were used. As a result, a useful life of amaranth from 322 to 358 days packed in Doy Pack packaging was obtained. **Keyword:** Shelf life, amaranth, isotherm

## ÍNDICE

<b>Contenido</b>	<b>pág.</b>
I. INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	2
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 AMARANTO .....	4
2.2 HARINA DE AMARANTO COCIDO .....	5
2.2.1 Límites de aceptabilidad para Harinas .....	6
2.2.2 Índice de Solubilidad en Agua (WSI), Índice de Absorción de Agua (WAI).....	7
2.3 FORMAS DE DETERIORO DE HARINAS COCIDAS .....	8
2.3.1 Enranciamiento oxidativo o autooxidación .....	9
2.3.2 Comportamiento de la humedad durante en almacenamiento.....	11
2.4 MODELOS MATEMÁTICOS DE ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE HUMEDAD.....	13
2.4.1 Isotermas de humedad de equilibrio.....	13
2.4.2 Modelos matemáticos de estabilidad de humedad .....	16
2.5 TRANSFERENCIA DE HUMEDAD EN ALIMENTOS EMPACADOS .....	22
2.5.1 Vida útil de alimento empacado .....	28
2.6 MÉTODOS NUMÉRICOS EN CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS .....	32
2.6.1 Integración numérica .....	33

2.6.2 Ecuaciones diferenciales ordinarias .....	34
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	37
3.1 Lugar de ejecución .....	37
3.2 Tipo de investigación .....	37
3.3 Nivel de investigación .....	37
3.4 Método de investigación .....	37
3.5 Metodología.....	38
3.6 Materiales y reactivos.....	38
3.6.1 Materiales .....	38
3.6.2 Equipos.....	39
3.6.3 Reactivos .....	39
3.7 Diseño de investigación.....	40
3.7.1 Diseño experimental.....	40
3.8 Población y muestra .....	40
3.8.1 Población .....	40
3.8.2 Muestra.....	41
3.9 Caracterización de la harina de amaranto cocido .....	41
3.9.1 Determinación de contenido de humedad .....	41
3.9.2 Determinación de actividad de agua de la harina.....	43
3.9.3 Determinación granulométrica .....	44

3.9.4	Determinación de Índice de adsorción de agua (WAI) e índice de solubilidad en agua (WSI) de muestras de harina .....	44
3.9.5	Determinación de Poder de hinchamiento (SP) de harina de amaranto .....	46
3.9.6	Determinación de humedad de equilibrio de la harina .....	46
3.10	Determinación de cambios durante el almacenamiento .....	47
3.10.1	Determinación de Índice de Peróxido .....	48
3.11	Predicción de vida útil .....	49
3.11.1	Determinación de los parámetros de los modelos matemáticos.....	50
3.11.2	Cálculo de humedad de equilibrio (isoterma de adsorción) simulado .....	55
3.11.3	Vida útil estimada .....	56
3.11.4	Estimación de humedad en almacenamiento .....	63
3.12	Análisis de datos.....	68
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	70
4.1	CARACTERÍSTICAS DE LA HARINA DE AMARANTO COCIDO.....	70
4.1.1	Características físico-químicas y funcionales .....	70
4.1.2	Granulometría de la harina .....	76
4.2	VIDA ÚTIL ESTIMADA .....	78
4.2.1	Resultado de determinación de humedad de equilibrio.....	78
4.2.2	Determinación de parámetros de los modelos matemáticos .....	79
4.2.3	Determinación de humedad de equilibrio simulado.....	81
4.2.4	Vida útil estimado .....	85



4.3 CAMBIO QUÍMICO DE LA HARINA .....	87
4.3.1 Variación de índice de peróxido durante el almacenamiento.....	88
4.3.2 Variación de humedad durante el almacenamiento de harina de amaranto cocido .....	89
V. CONCLUSIONES .....	92
VI. REFERENCIAS .....	94
ANEXOS .....	115

## Lista de Tablas

	Pág.
<b>Tabla 1</b> Límites Microbiológicos de la Harina .....	6
<b>Tabla 2</b> Modelos matemáticos para isotermas de humedad de equilibrio en alimentos .....	18
<b>Tabla 3</b> Definiciones comunes de varios conceptos útiles.....	31
<b>Tabla 4</b> Actividades de agua de solución saturada usada para la determinación la humedad de equilibrio a 23 °C.....	47
<b>Tabla 5</b> Características físico-químicas y funcionales de harina de amaranto cocido .....	73
<b>Tabla 6</b> Cantidad de retención en tamizaje de las harinas de amaranto cocido.....	77
<b>Tabla 7</b> Resultados experimentales de humedad de equilibrio para harina de amaranto cocido a 23°C .....	78
<b>Tabla 8</b> Valores de los parámetros de los modelos matemáticos para la estabilidad de harina cocida de amaranto a 23°C.....	80
<b>Tabla 9</b> Humedad de equilibrio experimental y simulado para los diferentes modelos matemáticos determinados a 23°C para harina cocida de amaranto. ....	82
<b>Tabla 10</b> Parámetros de bondad de ajuste de los modelos de sorción humedad de la harina de amaranto cocido.....	84
<b>Tabla 11</b> Vida útil de harina de amaranto cocido empacado en DOYPACK de permeabilidad de 11.4657 (g agua $\mu\text{m} \cdot \text{día}^{-1} \text{m}^{-2} \text{mmHg}^{-1}$ ) de 30 $\mu\text{m}$ de espesor.....	86
<b>Tabla 12</b> Variación de índice peróxido (meq O <sub>2</sub> / kg) en harina de amaranto cocido durante almacenamiento a 20 °C.....	88

**Tabla 13** Variación de humedad experimental durante el almacenamiento ..... 89

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema del movimiento de las moléculas de agua por la pared del empaque. .....	24
<b>Figura 2.</b> La representación gráfica del estudio de vida útil de un alimento .....	30
<b>Figura 3.</b> Diseño experimental de investigación.....	40
<b>Figura 4.</b> Muestras de harina de amaranto cocido .....	41
<b>Figura 5.</b> Pesado de muestras en la determinación de humedad.....	42
<b>Figura 6.</b> Muestras en ambientes a temperatura de 23°C y HR constantes. ....	43
<b>Figura 7.</b> Medición directa de actividad de agua en harina de amaranto cocido.....	43
<b>Figura 8.</b> Proceso de tamizado de la muestra en el análisis granulométrico .....	44
<b>Figura 9.</b> Muestras de tubos después de la sedimentación en la determinación de WSA y WAI.....	45
<b>Figura 10.</b> Desecadores con muestras para determinar humedad de equilibrio. ....	48
<b>Figura 11.</b> Diagrama de flujo del algoritmo del programa para predecir la vida útil de harina de amaranto cocido.....	50
<b>Figura 12.</b> Resultado de grafica de probabilidad de distribución de contenido de humedad en las muestras de harina de amaranto cocido usados.....	70
Figura 13. Grafica de histograma distribución de contenido de humedad en la harina de amaranto cocido.....	71
<b>Figura 14.</b> Distribución de masa (%) de la harina cocida de amaranto en función del tamaño de partícula .....	77
<b>Figura 15.</b> Isoterma de adsorción de agua en harina de amaranto cocido, experimental y simulado para diferentes modelos matemáticos evaluado a 23°C. ....	83

**Figura 16.** Incremento de humedad en el tiempo de almacenamiento en la harina de amaranto cocido a condiciones ambientales de 20°C ..... 90

## I. INTRODUCCIÓN

El amaranto es un pseudocereal con una rica historia como fuente de alimento en Mesoamérica y como un cultivo adecuado para ser producido en condiciones semiáridas (Guillen-Portal et al., 1999). El grano de la especie de amaranto es de alto valor nutricional en comparación con los cereales, posee un contenido relativamente alto de proteínas y una composición más balanceada de aminoácidos esenciales (Pisaříková et al., 2005) rica en lisina y triptófano, que son comparables a proteínas de origen animal (Bressani et al., 1992), ácidos grasos insaturados (Martirosyan et al., 2007) y contenido de fenoles (Paško et al., 2009); siendo dichos atributos los cuales predeterminan su uso como una sustitución de los cereales convencionales (Gorinstein et al., 2007) y como potencial alimento funcional- que contribuya- a mejorar el estado antioxidante (Caselato-Sousa & Amaya-Farfán, 2012).

De acuerdo con (Valencia et al., 2015), las propiedades funcionales de las harinas simples y compuestas determinan la aplicación de alimentos y el uso final de dichos materiales para otras aplicaciones. Estas propiedades son importantes para determinar los requisitos de empaque, el manejo de materias primas y la aplicación en el procesamiento en húmedo en la industria alimentaria. La descripción de las propiedades físicas, funcionales, propiedades bioactivas y vida útil de la harina de amaranto cocido producida de manera artesanal y comercializada en la ciudad de Huamanga aún carecen de volumen de información en la literatura la cual es necesaria

para que se introduzca como información a los consumidores en los empaques de estos productos cocidos.

El análisis granulométrico, propiedades funcionales, propiedades bioactivas y vida útil en las harinas son primordiales para la industria y los consumidores, ya que facilita la estandarización y proceso de productos, identificar los requisitos de la materia prima y los parámetros legales respecto al tamaño de las partículas (Rios et al., 2018). El mayor componente orgánico de las harinas vegetales son los almidones y los índices de solubilidad, absorción de agua y poder de hinchamiento se pueden utilizar como un indicativo del grado de modificación de los almidones por tratamientos termomecánicos. Mayores índices de solubilidad, absorción de agua y poder de hinchamiento en las harinas vegetales, indican una mayor facilidad para formar geles en presencia de calor y exceso de agua (Damodaran et al., 2007; García Jiménez & Vázquez, 2016). Las propiedades físicas y funcionales de las harinas pueden predecir el comportamiento del producto en la formación de pastas alimenticias, inducido por los efectos termomecánicos durante la extrusión.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Predicción de vida útil de harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) a partir de isoterma de adsorción de agua para diferentes modelos matemáticos.

## **Objetivos específicos**

1. Determinar las propiedades físicas y bioactivas de la harina de amaranto cocido.
2. Determinar las propiedades funcionales de: Índice de adsorción de agua (WAI-gel), índice de solubilidad en agua (WSI-gel) y poder de hinchamiento (SP) de la harina de amaranto cocido.
3. Determinar los parámetros de los modelos matemáticos de: GAB, Oswin, Henderson y Caurie, aplicados a la isoterma de estabilidad de agua en la harina de amaranto cocido.
4. Simular la isoterma de estabilidad de la harina cocida de amaranto usando diferentes modelos matemáticos como GAB, Oswin, Henderson y Caurie.
5. Estimar la vida útil de harina de amaranto cocido usando diferentes modelos matemáticos de las isotermas de estabilidad de humedad.
6. Determinar el cambio químico de la harina de amaranto cocido (índice de peróxido).



## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AMARANTO

La kiwicha (*Amaranthus caudatus*) es una planta comúnmente cultivada durante el tiempo de los incas y otras culturas anteriores en el Perú. En México los aztecas cultivaron otro amaranto, el *Amaranthus cruentus*. El color de las semillas varía de negro hasta rojo, siendo más común el blanco o marfil. El valor nutricional tanto de la kiwicha, es excepcional. Especialmente destacan sus proteínas de alto valor biológico, pero también poseen un contenido relativamente alto de aceite de buenas características nutricionales. Son también importantes fuentes de micronutrientes como calcio y hierro([Repo-Carrasco et al., 2003](#)).

Los granos de amaranto han recibido una atención creciente como fuente nutricional de aminoácidos y minerales para aplicaciones de alimentos sin gluten ([USDA et al., 2019](#)). El amaranto, una pequeña semilla antigua, ha perdurado a lo largo de los siglos, desde las primeras civilizaciones hasta su resurgimiento actual, como una importante fuente de alimento y un grano sin gluten altamente nutritivo.

El valor nutricional del amaranto es superior al de la mayoría de los cereales, debido a su alto contenido de proteínas sin gluten con un perfil equilibrado de aminoácidos esenciales, en particular de lisina que suele ser insuficiente en otros cereales básicos ([Sanz-Penella et al., 2013b](#)). Además, el amaranto gana cada vez más atención debido a su alto contenido de fibra dietética y minerales, incluidos calcio,

hierro, magnesio, fósforo, zinc, cobre y manganeso, que son más altos que el trigo (USDA et al., 2019). Además, el aceite de amaranto contiene vitamina E en cantidades similares al aceite de oliva, lo que es beneficioso para las personas con presión arterial alta y enfermedades del corazón (J. Alegbejo, 2014).

## **2.2 HARINA DE AMARANTO COCIDO**

Producto elaborado a base de amaranto clasificado y/o seleccionado, desinfectado libres de impurezas que han sufrido cocción y luego sido triturados hasta formar la harina; que puede ser fortificada y/o enriquecida con vitaminas y minerales.

El valor nutricional del amaranto es superior al de la mayoría de los cereales, debido a su alto contenido de proteínas sin gluten con un perfil equilibrado de aminoácidos esenciales, en particular de lisina que suele ser insuficiente en otros cereales básicos (Sanz-Penella et al., 2013a). Además, el aceite de amaranto contiene vitamina E en cantidades similares al aceite de oliva, lo que es beneficioso para las personas con presión arterial alta y enfermedades del corazón (J. O. Alegbejo, 2013). (Sanz-Penella et al., 2013a) descubrieron que la harina de amaranto aumentaba el valor nutritivo, la fibra dietética y el contenido de minerales y proteínas en la mezcla de elaboración del pan.

El amaranto es un pseudocereal de origen andino-americano, que posee un elevado contenido de proteínas (18 %) de alto valor biológico, por la calidad de sus aminoácidos (como por ejemplo la lisina que es esencial en la alimentación humana), un importante

contenido de fibra (10 %), un bajo contenido de grasa (5 %), un alto nivel de hierro (90 ppm), y sustancias antioxidantes como tocoferoles y tocotrienoles (Díaz, 2012).

Las humedades reportadas en harina de amaranto tostada (1,96 %), proteínas (16.56 %), carbohidratos (65.2 %), fibra dietaria total de (6.7 %) y ceniza (2.62 %) (Liu et al., 2022).

### 2.2.1 Límites de aceptabilidad para Harinas

#### a) Requerimientos Microbiológicos

**Tabla 1**

Límites Microbiológicos de la Harina

Agente microbiano	Categoría	Clase	n	c	Límite por g	
					m	M
Aerobios mesófilos	3	3	5	1	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
Coliformes	5	3	5	2	10	10 <sup>2</sup>
<i>Bacillus cereus</i>	8	3	5	1	10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>
Levaduras	5	3	5	2	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>
Mohos	5	3	5	2	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>
Salmonella sp.	10	2	5	0	ausencia/25g	-

**Fuente:** R.M. N° 451-2006/MINSA “Norma Sanitaria para la Fabricación de Alimentos a Base de Granos y Otros, destinados a Programas Sociales de Alimentación.

**b) Requisitos Físico-químicos**

Humedad	: Menor o igual a 8.0%
Acidez (expresada en ácido sulfúrico)	: Menor o igual a 0.4%
Índice de peróxido	: Menor a 10 mEq/kg de grasa

**c) Requisitos Organolépticos**

Olor: Característico                      Sabor: Característico

**2.2.2 Índice de Solubilidad en Agua (WSI), Índice de Absorción de Agua (WAI)**

El tratamiento térmico de los cereales y pseudocereales para producir harinas puede cambiar las propiedades tecnológicas de las harinas, por ejemplo, reduce el valor de las viscosidades de rotura y final y la tendencia a la retrogradación ([Sun et al., 2018](#)).

La temperatura de proceso produce la degradación del almidón, esta degradación se puede observar a través del Índice de solubilidad en agua (WSI), Índice de absorción de agua (WAI) en harinas obtenidas de cereales torreados. La solubilidad del agua puede ser usada como un indicador de la degradación de las macromoléculas (proteínas y carbohidratos), midiendo la cantidad de elementos solubles del almidón después de la extrusión ([Ding et al., 2005](#)). Los diferentes cereales y pseudocereales presentan distintas cantidades de proteína, fibras dietéticas, almidón resistente y un perfil químico que influye en sus propiedades tecnológicas, es decir, absorción de agua y aceite, emulsificación, solubilidad en agua y propiedades de gelificación ([Gupta et al., 2018](#); [Lin & Fernández-Fraguas, 2020](#); [Ramírez-Jiménez et al., 2014](#)).

### 2.3 FORMAS DE DETERIORO DE HARINAS COCIDAS

La capacidad de almacenamiento y la vida útil de la harina dependen de varios factores. Los factores intrínsecos, como el contenido y la composición del agua, y los factores extrínsecos, como la temperatura, el empaque, los gases o los vapores, afectan los cambios físicos, químicos y bioquímicos en la harina almacenada (Li et al., 2017a). Generalmente, la estabilidad de un producto alimenticio está en función de las técnicas de procesamiento y las condiciones de almacenamiento (Li et al., 2017a).

La temperatura y el tipo de materiales de empaque son factores importantes para controlar el deterioro de la harina. La vida útil de la harina fresca se puede extender mediante la regulación de dichos parámetros (Li et al., 2017a). Para aprovechar todas las cualidades de la harina en su procesamiento, ya sea sola o como una mezcla, es esencial comprender los efectos de la temperatura y envases usados, en los cambios de las propiedades fisicoquímicas, microbianas y sensoriales que pudieran ocurrir en el almacenamiento. (Iqbal & Fitzpatrick, 2006) afirman que la exposición de las harinas a cierta temperatura y humedad relativa puede provocar el apelmazamiento. El uso de materiales de empaque inadecuados es un error que se cometería en poscosecha, afectan la calidad y la vida útil de la harina. La harina puede absorber y retener fácilmente la humedad durante el transporte y el almacenamiento. Los materiales de embalaje poseen una característica propia y única e individual, como es el caso de permeabilidad al oxígeno y la humedad, por lo que su elección del material de embalaje es vital para asegurar su conservación. El oxígeno puede generar

la reacción de uno de los componentes del alimento como es la grasa y el agua puede generar las reacciones enzimáticas como la activación de las enzimas como la lipasa.

Los granos de cereales y pseudocereales al ser sometido a un tratamiento térmico (torreado) sufren la inactivación de sus enzimas presentes en el pericarpio, principalmente lipasa y peroxidasa, evitando así su enranciamiento por hidrólisis enzimática. Las capas externas de los cereales contienen enzimas activas que transforman los lípidos en ácidos grasos libres ([Gutkoski & El-Dash, 1998](#)).

### **2.3.1 Enranciamiento oxidativo o autooxidación**

El enranciamiento es un proceso por el cual un alimento con alto contenido en grasas o aceites se altera con el tiempo adquiriendo un sabor desagradable. Características: Las grasas y aceites en contacto con el aire, humedad y a cierta temperatura sufren cambios, con el tiempo, en su naturaleza química y en sus caracteres organolépticos. Estas alteraciones reciben comúnmente el nombre de rancidez o enranciamiento. El enranciamiento puede ser por oxidación o por hidrólisis ([Segurondo Loza & Cortez Quisbert, 2020](#)).

El enranciamiento oxidativo se debe a la oxidación de los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados con formación de peróxidos o hidro-peróxidos, que posteriormente se polimerizan y descomponen dando origen a la formación de aldehídos, cetonas y ácidos de menor peso molecular, entre ellos el aldehído epidrinal. Este proceso es acelerado en presencia de la luz, calor, humedad, otros ácidos grasos

libres y ciertos catalizadores inorgánicos como las sales de hierro y cobre. Las grasas que han experimentado oxidación son de sabor y olor desagradable y parecen ser ligeramente tóxicas para algunos individuos. El enranciamiento oxidativo, además destruye las vitaminas liposolubles, particularmente las vitaminas A y E (tocoferoles) ([Segurondo Loza & Cortez Quisbert, 2020](#)).

Los principales ácidos grasos encontrados en el aceite de amaranto son el palmítico (16:0) en un porcentaje promedio de 18%, el ácido oleico (18:1 n-9) que juntamente con el ácido linoleico (18:2 n-6) hacen un total de 75% del total de ácidos grasos, y el ácido linoleico (18:3 n-3) presente en un 3% del total de ácidos grasos ([Rodas & Bressani, 2009](#)).

El índice de peróxido, es un indicador mucho más sensible al estadio inicial de la oxidación, y su presencia es un indicio de que la deterioración del sabor y olor, en función de su inestabilidad, está por ocurrir. Cuando su concentración alcanza cierto nivel, ocurren cambios complejos, formando compuestos de bajo peso molecular, propios de su degradación ([ARAÚJO, 2004](#)).

Lípidos se oxidan lentamente, los ácidos grasos poliinsaturados son los componentes menos estables, siendo atacados fácilmente por el oxígeno del aire, los ácidos grasos saturados también se oxidan a altas temperaturas ([Shafiur & Rahman, 2003](#)).

El tipo predominante de enranciamiento es el enranciamiento oxidativo. En este proceso, los ácidos grasos insaturados están sujetos a enranciamiento oxidativo o autooxidación, y a cuantos más dobles enlaces hay, mayor es la posibilidad de adición de oxígeno en los dobles enlaces, aumentando el riesgo de que la grasa o el aceite se enrancien. El Codex alimentarius para Grasas y aceites, referencia un valor límite hasta 10 meq de O<sub>2</sub> activo/ kg aceite.

### **2.3.2 Comportamiento de la humedad durante en almacenamiento**

El contenido de humedad es otro factor importante que afecta el almacenamiento de la humedad, está muy influenciado por las condiciones ambientales de almacenamiento. En general, la harina de cereal tiene un contenido de humedad más bajo y se considera microbiológicamente segura, pero la calidad puede degradarse por completo durante el almacenamiento a largo plazo. Con los cambios en las condiciones de manipulación y molienda, se ha informado que la harina de amaranto contiene un contenido de humedad promedio de 6 a 13 %, y se ha observado que el valor aumenta significativamente durante el almacenamiento (V. Abioye et al., 2018; Akinola et al., 2017b; Gull et al., 2016b). Se ha demostrado que el contenido de humedad o la humedad y la temperatura de almacenamiento provocan ciertos cambios en la acidez y el pH de los productos (Goyal et al., 2017b). Ravikumar & Narayanan,( 2017) observaron un aumento concomitante en el contenido de peróxido de la harina de mijo perla durante el almacenamiento, y la ranciedad hidrolítica se atribuyó al aumento de la humedad. Un mayor contenido de humedad también se asocia con actividades lipolíticas y proteolíticas elevadas que conducen aún más a la producción



de ácidos grasos libres y a la pérdida de nutrientes, lo que resulta en características sensoriales inferiores (Nasir et al., 2004). El crecimiento microbiano no deseado es un tema importante a abordar porque los peligros microbianos son factores importantes que pueden afectar a los consumidores a través de la liberación de toxinas dañinas que pueden causar intoxicación alimentaria. Además, la humedad está directamente relacionada con el crecimiento microbiano, y una humedad más baja es dañina debido a una actividad y respiración más lentas. (Ben Mustapha et al., 2014).

Los alimentos con humedad baja y humedad intermedia ( $a_w < 0.85$ ), mayoría de alimentos tienen una vida útil prolongada a temperatura ambiente (Beuchat et al., 2013; Farakos et al., 2013).

En un sistema cerrado con un contenido de agua fijo, la  $a_w$  de los productos alimenticios cambia con un cambio de temperatura y este cambio depende de los constituyentes de los alimentos, el estado fisicoquímico y la estructura física de los productos alimenticios (Syamaladevi, Tadapaneni, et al., 2016; Syamaladevi, Tang, et al., 2016). Por lo tanto, es necesario determinar la  $a_w$  de los productos alimenticios a las temperaturas de tratamiento y analizar la diferencia en la efectividad de los tratamientos térmicos en función de los cambios en la  $a_w$  de los productos alimenticios durante el tratamiento (Tadapaneni, Syamaladevi, et al., 2017; Tadapaneni et al., 2018). El aumento o la disminución de  $a_w$  a temperaturas elevadas depende del tipo y composición química de los alimentos, existe pocos trabajos sobre el cambio de  $a_w$  en muchos alimentos a temperaturas elevadas (Gautam et al., 2020).

La adsorción y acumulación de humedad de un alimento, determina la calidad y la vida útil de los alimentos con baja humedad. Debido a que el deterioro de su calidad generalmente depende de la facilidad con que adsorbe la humedad o actividad de agua, hasta alcanzar un contenido de humedad crítico, al cual se conoce como vida útil (Eihner, 1985; Singh & Anderson, 2004).

La velocidad de la transferencia de humedad a los alimentos con bajo contenido de humedad, va a depender del envase usado y su permeabilidad al vapor de agua, de la actividad del agua del alimento, y el medio de almacenamiento como la temperatura y la humedad (Robertson & Lee, 2021). Se han propuesto varias relaciones entre las propiedades de adsorción de humedad de los alimentos, la permeabilidad al vapor de agua de las películas plásticas y la vida útil desde la publicación fundamental de (Heiss, 1958), quien predijo por primera vez la transferencia de humedad a los alimentos en condiciones estables de temperatura y humedad. El modelo matemático de permeación de vapor de agua basado en la ley de Fick y la isoterma de adsorción de humedad (MSI), muchos investigadores han usado en la simulación para predecir o estimar la vida útil de los alimentos (Eihner, 1985; Escobedo-Avellaneda et al., 2012; Macedo et al., 2013; Sirpatrawan, 2009).

## **2.4 MODELOS MATEMÁTICOS DE ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE HUMEDAD**

### **2.4.1 Isotermas de humedad de equilibrio**

Las isotermas de sorción de humedad son la relación entre el contenido de humedad en el equilibrio (masa de agua por unidad en base seca) y la actividad de agua del alimento ([Labuza, 1968](#)).

La isoterma de adsorción de humedad (ISM) es una gráfica del contenido de humedad en equilibrio (g) versus la actividad del agua ( $a_w$ ) a una temperatura dada, que se usa comúnmente para estudiar el comportamiento higroscópico de los alimentos([Aviara, 2020](#); [Bell & Labuza, 2000](#)).

Una isoterma más pronunciada o menos pronunciada dependerá de la higroscopicidad de los alimentos. La alta posición de la curva de adsorción del alimento, indica una alta adsorción de humedad del medio ambiente e indica que es muy higroscopio ([Aviara, 2020](#); [Bell & Labuza, 2000](#)). Se han sugerido varias ecuaciones para el modelado MSI de alimentos en la literatura ([Berg & Bruin, 1981](#); [Chirife & Iglesias, 1978](#)). Sin embargo, hasta donde sabemos, ningún modelo MSI hasta ahora es capaz de generar un índice que mida la higroscopicidad de los alimentos y se ha utilizado para ello.

De todos los modelos matemáticos de isotermas de adsorción de humedad, el modelo Guggenheim-Anderson de Boer (GAB) es el más utilizado ([Abdolshahi et al., 2020](#); [Al-Muhtaseb et al., 2002](#)) ha sido reconocido como un modelo de referencia para los productos agrícolas en Europa([Wolf et al., 1985](#)) y Estados Unidos ([Lomauro et al., 1985](#)). Esto se puede atribuir a tres razones: a) El modelo GAB se considera la ecuación de modelado de productos básicos agrícolas más exitosa disponible

([Abdolshahi et al., 2020](#); [Al-Muhtaseb et al., 2002](#)). (b) El modelo GAB es el modelo más general disponible y se puede utilizar para la mayoría de las variedades de alimentos y una amplia gama de niveles de  $a_w$  ([Basu et al., 2006](#); [Lomauro et al., 1985](#)). Con el modelo GAB, el contenido de humedad de la monocapa ( $M_0$ ), que es de gran importancia en la ingeniería alimentaria, se puede calcular directamente. El conocimiento del  $M_0$  se aplica al procesamiento y análisis de alimentos típicamente de tres maneras: (a)  $M_0$  se reconoce como el contenido de humedad óptimo para lograr la mejor estabilidad de almacenamiento de los alimentos, es decir, el crecimiento microbiológico más lento, la oxidación de lípidos y la reacción de pardeamiento durante el almacenamiento ([Labuza et al., 1971](#); [Takeungwongtrakul et al., 2020](#)). (b)  $M_0$  se toma como el punto final del secado al cual se debe deshidratar el alimento para lograr una estabilidad de almacenamiento satisfactoria con el mínimo consumo de energía ([Aviara & Ajibola, 2002](#)). (c)  $M_0$  se utiliza para medir el área de superficie adsorbente efectiva, proporcionando una idea del número de sitios de sorción activos en productos alimenticios ([Aviara, 2020](#); [Mazza & LeMaguer, 1978](#); [Rizvi, 2005](#)). En los últimos años, el cálculo de  $M_0$  se ha convertido en un análisis de rutina en la investigación de MSI de alimentos. Tenga en cuenta que la curva MSI se desarrolló originalmente para evaluar la higroscopicidad de los alimentos ([Bell & Labuza, 2000](#); [Bhandari & Adhikari, 2008](#)).

La curva MSI representa la relación del contenido de humedad de equilibrio de un producto alimenticio con la humedad relativa del entorno que lo rodea a una temperatura particular y brindan información útil para las operaciones de procesamiento de alimentos, como el secado, el envasado y el almacenamiento ([Kumar](#)

& Mishra, 2006; Tonon et al., 2009). Una isoterma de adsorción de humedad manifiesta su higroscopicidad si un alimento se expone al medio ambiente con una temperatura y la humedad relativa y composición del alimento (García-Pérez et al., 2008).. En la literatura, se dispone de una gran cantidad de modelos de isothermas que se pueden clasificar en varios grupos; modelos cinéticos basados en una monocapa de agua absorbida (modelo BET), modelos cinéticos basados en una película multicapa y condensada (modelo GAB), modelos semiempíricos (modelo Halsey) y modelos puramente empíricos (por ejemplo, modelos de Oswin y Smith). Las isothermas de sorción de humedad son únicas para cada alimento y deben evaluarse experimentalmente (Muzaffar & Kumar, 2016).

#### **2.4.2 Modelos matemáticos de estabilidad de humedad**

Un modelo matemático representa un proceso que utiliza modelos matemáticos. Los modelos matemáticos se utilizan en muchos campos del conocimiento: como en las ciencias de la ingeniería de alimentos relacionadas con los modelos de vida útil, así como las múltiples ramas de las ciencias sociales (como la economía, la psicología, la sociología, las ciencias políticas, etc) (Piergiovanni & Limbo, 2019). Los modelos de vida útil en particular, puede ser lo siguiente:

- 1. Lineal vs. no lineal:** es lineal si todos los operadores presentan linealidad, donde, las ecuaciones matemáticas son ecuaciones de primer grado. En los estudios de vida útil, tanto los modelos lineales como los no lineales son comunes y, con bastante frecuencia, el enfoque de los problemas no lineales es

usada por su simplicidad. Como sucede en el manejo de isothermas de humedad para vida útil dependientes de la humedad ([Labuza, 1982](#)).

- 2. Determinista versus probabilístico:** la mayoría de los modelos de vida útil son deterministas (los parámetros están determinados unívocamente por variables y por sus niveles inicial y final). Estos tipos de modelos siempre funcionan de la misma manera y dan los mismos resultados bajo diferentes condiciones iniciales. En los modelos probabilísticos (o estocásticos), las variables se definen mediante distribuciones de probabilidad aleatorias. En estudios de vida útil donde se utilizan enfoques de análisis de supervivencia se utilizan modelos estocásticos ([Robertson, 2012](#)).

El modelo lineal es usualmente usado en la industria por su facilidad de aplicación. Sin embargo, el cálculo para determinar las constantes de algunos modelos no es muy sencillo, por ello en la solución de dichos modelos en la investigación usaremos la aplicación de las herramientas de cálculo como son los métodos numéricos. Como también usados para otras isothermas de adsorción no lineales ([Robertson & Lee, 2021](#)).

Algunos modelos matemáticos para la representación de las isothermas son las mostradas en la Tabla 2 ([Kamau et al. ,2018](#)).

**Tabla 2***Modelos matemáticos para isotermas de humedad de equilibrio en alimentos*

Modelo	Modelo matemático	Característica
GAB	$M = \frac{M_0 * C_g * k_g * a_w}{(1 - k_g * a_w) (1 + k_g * a_w (C_g - 1))}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de <math>a_w</math> entre 0 - 0.9</li> <li>• adecuado para analizar diversos productos alimenticios,</li> </ul>
Oswin	$M = A_1 \left[ \frac{a_w}{1 - a_w} \right]^{B_1}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de <math>a_w</math> entre 0.05-0.90</li> <li>• Aplicable a alimentos ricos en proteínas y almidones</li> </ul>
Henderson	$1 - a_w = \exp(-A_2 M^{B_2})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de <math>a_w</math> entre 0.10-0.75</li> <li>• Uno de los más empleados, que describe el comportamiento de alimentos tales como granos, cereales y frutas</li> </ul>
Caurie	$M = \exp(A_3 + B_3 a_w)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de <math>a_w &lt; 0.98</math></li> </ul>

Fuente: (Van den Berg, 1985); (Oswin, 1946a); (Henderson, 1952a);

Aunque se han utilizado muchas funciones matemáticas para describir las isotermas de sorción de los alimentos secos y luego se han aplicado para estimar su vida útil, el modelo lineal simple se ha utilizado ampliamente después de su introducción por (Karel & Labuza, 1969). Los modelos de isotermas de sorción no lineal más utilizados incluyen las ecuaciones de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) y de Oswin, Halsey y Chung-Pfost (Escobedo-Avellaneda et al., 2012; Kulchan et al., 2010; Ruiz-López & Herman-Lara, 2009). Si bien se han aplicado muchas ecuaciones no lineales de rangos más amplios de actividad del agua a muchos alimentos, la ecuación de GAB es la más usada en casi todo los alimentos (Wani & Kumar, 2016a).

### Modelo GAB (Guggenheim – Amderson – de Boer)

Se han derivado muchas relaciones relacionando la actividad del agua  $a_w$  de un alimento con su contenido de humedad (Basu et al., 2006). El modelo Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) ha sido ampliamente utilizado por muchos investigadores desde los finales de la década del 1970, y actualmente es el modelo más utilizado. Es un modelo de tres parámetros con coeficientes físicamente significativos (Robertson & Lee, 2021):

$$\frac{M}{M_0} = \frac{k_g C a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C g k a_w)} \quad (1)$$

Dónde:

$a_w$  = Actividad del agua =  $p$  (presión de vapor del agua ejercida por los alimentos) dividida por  $p_0$  (presión de vapor saturada de agua pura a la misma temperatura)

$M$  = Contenido de humedad (en base seco) a la actividad de agua  $a_w$ ;

$M_0$  = Contenido de humedad correspondiente a la saturación de todos los sitios de adsorción primarios por una molécula de agua (equivalente a la monocapa BET);

$C$  = Parámetro adimensional relacionado con el calor de sorción de la región de la monocapa y a menudo denominado constante de Guggenheim.

$k_g$  = Parámetro adimensional relacionado con el calor de sorción de la región multicapa.

La ventaja del modelo GAB, es un método objetivo y sirve para ajustar los datos de la isoterma de sorción para la mayoría de los alimentos hasta 0.9  $a_w$ . Debido



a su naturaleza de su ecuación matemática que no es lineal, sus parámetros pueden obtenerse mediante diferentes métodos de regresión no lineal, que a menudo conducen a resultados similares o semejantes (Robertson & Lee, 2021). La ecuación GAB no lineal indirecta (3 constantes  $M_0$ ,  $K_g$  y  $C$ ) generalmente se ajustaba mejor a los resultados experimentales que la ecuación GAB directa (6 constantes) y se recomienda un análisis de regresión ponderado no lineal directo con fines de predicción (Samaniego-Esguerra & Robertson, 1991).

$$\frac{a_w}{M} = \frac{1}{M_0 C k} + \frac{(C-2)}{M_0 C} * a_w + \frac{(1-C)k}{M_0 C} * a_w^2 \quad (2)$$

Ecuación de ajuste cuadrático

$$\frac{a_w}{M} = \alpha a_w^2 + \beta a_w + \lambda \quad (3)$$

Cálculo de constantes después de regresión cuadrática

$$R = \sqrt{\beta^2 - 4 * \alpha * \lambda}$$

$$K_g = \frac{R - \beta}{2\lambda}$$

$$C = \frac{\beta}{\lambda K} + 2$$

$$M_0 = \frac{1}{\lambda K C}$$

Humedad en función de los parámetros de GAB

$$M = \frac{M_0 C k g a_w}{(1 - k g a_w)(1 - k g a_w + C k g a_w)} \quad (4)$$

Actividad de agua en función de humedad y parámetros de GAB

$$aw_{int}(M) = \left( \frac{(2 + ((M_0/M) - 1) * C) - [(2 + ((M_0/M) - 1) * C)^2 - 4 + 4 * C]^{0.5}}{2 * kg * (1 - C)} \right) \quad (5)$$

### Ecuación de Henderson

Uno de los modelos más utilizados que relaciona la actividad del agua con la cantidad de agua absorbida es la ecuación de Henderson ([Henderson, 1952b](#)). Esto se puede escribir como:

$$M = \left[ \frac{\ln(1 - aw)}{-A_2} \right]^{1/B_2} \quad (6)$$

$$1 - aw = \exp(-A_2 M^{B_2}) \quad (7)$$

donde M es el contenido de humedad (kg / kg sólido seco), A<sub>2</sub> y B<sub>2</sub> son constantes. Se ha informado que un gráfico linealizado de ln[ln(aw)] versus el contenido de humedad da lugar a tres "isotermas localizadas" que no necesariamente brindan información precisa sobre el estado físico del agua, como se pensó originalmente.

### Ecuación de Oswin

Oswin desarrolló un modelo empírico que es una expansión en serie para curvas con forma sigmoidea y puede escribirse como: ([Oswin, 1946b](#)).

$$M = A_1 \left[ \frac{aw}{1 - aw} \right]^{B_1} \quad (8)$$

$$aw_{int} = \frac{\left(\frac{M}{A_1}\right)^{1/B_1}}{\left(1 + \left(\frac{M}{AA_1}\right)^{1/B_1}\right)} \quad (9)$$

donde M es el contenido de humedad (kg=kg sólido seco), A<sub>1</sub> y B<sub>1</sub> son constantes. Boquet et al. consideró que la ecuación de Oswin era la mejor para describir las isotermas de los alimentos ricos en almidón y un ajuste razonablemente bueno para la carne y las verduras.

### **Ecuación de Caurie**

La ecuación de Kauri también permite estimar el número de propiedades del agua libre, el número de sitios de unión, la masa de agua libre, el área superficial y la fracción de agua unida (Rao et al., 2014).

$$\ln(M) = A_3 + B_3 aw \quad (10)$$

$$aw_{int} = \frac{\ln(M) - A_3}{B_3} \quad (11)$$

## **2.5 TRANSFERENCIA DE HUMEDAD EN ALIMENTOS EMPACADOS**

Se tiene el siguiente esquema (Figura 1) o sistema de estudio, y tomando como referencia la primera ley de Fick  $J = -D \frac{dC}{dz}$  y la ley de Henry  $C = S.P$  de ecuación de difusión de transferencia de humedad a través de un film. Y asumiendo que el

equilibrio de humedad es rápido entre el producto y el espacio libre del empaque; el equilibrio entre el espacio libre del empaque y el medio exterior son iguales.

La ley de difusión de Fick es el siguiente:

$$J = -D \frac{dC}{dz} \quad (12)$$

Donde:

$J$  = Flujo = cantidad / tiempo / área.       $C$  = concentración = cantidad / volumen.

$Z$  = espesor de empaque.  $D$  = coeficiente de difusión ( $L^2$  / tiempo).

$dC/dz$  = gradiente de concentración.

La ley de Henry es la siguiente:

$$C = S.P \quad (13)$$

Donde:

$C$  = moles / cc.

$S$  = moles / cc mmHg = coeficiente de solubilidad.

$P$  = presión parcial de agua (mmHg).

Dividiendo la ecuación 13 entre  $z$  y sacado la diferencial se tiene:

$$\frac{dC}{dz} = S \cdot \frac{dP}{dz} \quad (14)$$

Reemplazando la ecuación 14 en la ecuación 12 tenemos:

$$J = -DS \frac{dP}{dz} \quad (15)$$

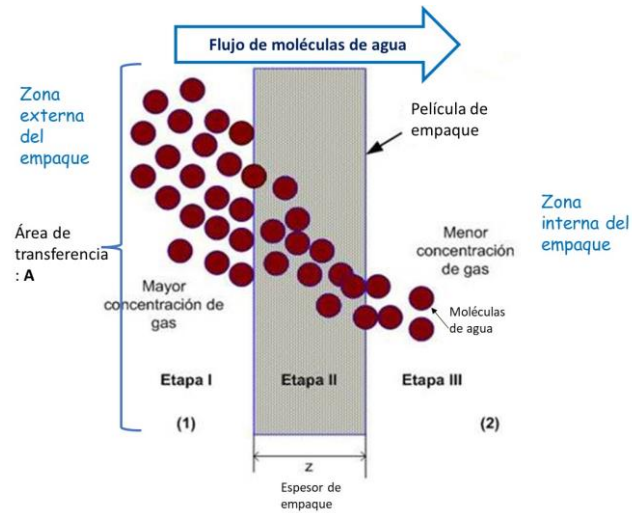


Figura 1. Esquema del movimiento de las moléculas de agua por la pared del empaque.

Concepto de flujo de vapor de agua ( $W$ ) a través de una sección por unidad de tiempo se tiene:

$$J = -\frac{dW}{A dt} \quad (16)$$

Igualando las ecuaciones 15 y 16 tenemos

$$\frac{dw}{A dt} = DS \frac{dP}{dz} \quad (17)$$

De la ecuación 17, hacemos  $DS = k$ , e integrando el segundo término tenemos:

$$\frac{dw}{A dt} = k \frac{\int_{p^{int}}^{p^{ext}} dP}{\int_0^z dz} \quad (18)$$

Integrando la ecuación 18 entre los límites se tiene:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{k}{z} \cdot A \cdot (P_{ext} - P_{int}) \quad (19)$$

Donde:

$\frac{dw}{dt}$  = velocidad de transporte masa de agua / día.

$k$  = constante.

$P_{ext}$  = Presión parcial de agua en equilibrio fuera del empaque.

$P_{int}$  = Presión parcial de agua en equilibrio dentro del empaque.

$A$  = área de transferencia.

La presión parcial del vapor de agua, es:

$$P_{wa} = A_w * P_{ws} \quad (20)$$

Donde

$P_{wa}$ : Presión parcial del vapor de agua en la capa límite sobre la superficie del producto

$A_w$  : Actividad del agua en la superficie del producto,

$P_{ws}$ : Presión de vapor de saturación del agua en la superficie del producto y puede aproximarse satisfactoriamente a partir de la temperatura de la superficie del producto utilizando la ecuación de Antonine, ecuación 21.

$$P_{ws} \approx \exp \left[ 23.4795 - \frac{3990.5}{T+233.833} \right] \quad (21)$$

Además,  $P_{wa}$ , que es la presión parcial del vapor de agua en el aire del ambiente se puede determinar usando la fórmula dada por la ecuación 22.

$$P_{wa} = HR * P_{ws} \quad (22)$$

Donde:

HR: Humedad relativa.

$P_{wa}$ : Presión de vapor de saturación del agua en el aire a granel y se puede obtener usando la ecuación de Antonine a la temperatura del aire.

La ecuación 19 multiplicando por  $\frac{P_s}{P_s}$  al segundo miembro se tiene:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{k}{z} A P_s \left( \frac{P_{ext}}{P_s} - \frac{P_{int}}{P_s} \right) \quad (23)$$

Por definición de  $a_{we} = \frac{P_{ext}}{P_s}$ ,  $a_{wi} = \frac{P_{int}}{P_s}$  y simplificando la ecuación 23 se

tiene:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{k}{z} \cdot A \cdot P_s \cdot (a_{we} - a_{wi}) \quad (24)$$

Definiendo la humedad en base seca en un alimento, como la cantidad de agua por cantidad de masa seca (M) tenemos la siguiente ecuación 25:

$$M = \frac{W(\text{peso de agua})}{m_s(\text{peso de solido seco})} \quad (25)$$

La cantidad de agua (W) en el alimento es:

$$W = M m_s \quad (26)$$

haciendo diferenciación a la ecuación 26, la masa sólida seca es constante:

$$dW = ms * dM \quad (27)$$

En la ecuación 27 la variación de humedad en base a 100 g de masa seca como función de la variación del tiempo será:

$$\frac{dW}{dt} = ms \frac{dM}{dt} \quad (28)$$

Donde:

ms = materia seca (g de masa seca).

W = masa de agua.

M = humedad en base seca (g de agua /100 g de masa seca).

Reemplazando la ecuación 28 en la ecuación 24 se tiene:

$$\frac{ms dM}{dt} = \frac{k}{z} \cdot A \cdot P_s (aw_{ext} - aw_i(M)) \quad (29)$$

De la ecuación 29 despejando la expresión dM/dt y simplificando se tiene:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{k}{z} \frac{A}{ms} P_s (aw_e - aw_{int}(M)) \quad (30)$$

En la ecuación 30 haciendo  $k = Wvp$  (la permeanza),  $z =$  espesor, esta ecuación podemos expresar como:

$$\frac{dM}{dt} = Wvp \frac{1}{esp} \frac{A}{ms} p_s (aw_{ext} - aw_{int}(M)) \quad (31)$$

Ecuación usada también por (Lee & Robertson, 2021) en la influencia interactiva de los criterios de decisión, de la película de envasado, la temperatura y la humedad de almacenamiento en la vida útil de los vegetales secos envasados.



El valor de presión de vapor saturado ( $P_s$ ) fue estimado para la temperatura deseada por la ecuación 32:

$$P_s(mmHg) = 1132570000 * exp(- 5269/(T + 273.15)) \quad (32)$$

### 2.5.1 Vida útil de alimento empacado

Desarrollando la integral en la ecuación 31, dt desde cero a t y humedad desde humedad inicial del alimento ( $M_i$ ) hasta una humedad crítica ( $M_c$ ) o humedad límite de norma técnica del alimento se tiene:

$$t_{(días)} = \frac{esp \ ms}{Wvp \ A \ p_s} \int_{M_i}^{M_c} \frac{dM}{(aw_{ext} - aw_{int}(M))} \quad (33)$$

Donde:

$Wvp$ : = Permeabilidad al vapor de agua del empaque

$ms$  = materia seca.

$M_i$  = humedad inicial del alimento (base seca).

$M_c$  = Humedad crítica del alimento (base seca)

$A$  = área de transferencia del empaque

$P_s$  = Presión de vapor saturado a la temperatura del medio ambiente.

$a_{w_{int}(X)}$ : = actividad de agua del alimento en función de la humedad de equilibrio, la función matemática dependerá de los modelos matemáticos como GAB, Oswin, Henderson, Caurie.

La predicción de la transferencia de humedad a un alimento envasado requiere el análisis de ciertas condiciones de contorno. Los supuestos asumidos son; la permeabilidad del empaque es constante, las condiciones ambientales de almacenamiento están a temperatura y humedad relativas constantes, y que la presión

de vapor del agua en el alimento sigue alguna función simple del contenido de humedad representada por una isoterma de adsorción propia del alimento. Por tanto, se deduce que la presión interna en el alimento varía con el tiempo (Robertson & Lee, 2021).

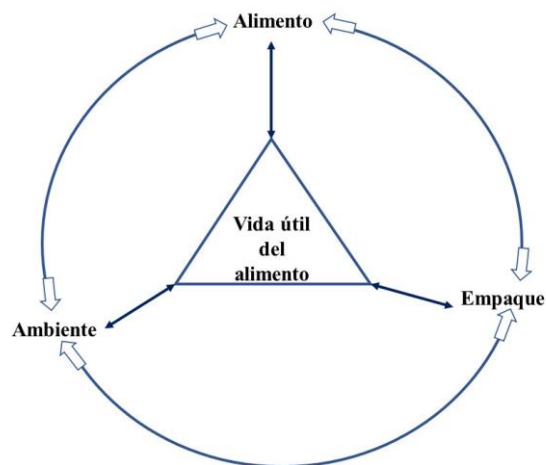
Otro supuesto es que el gradiente de humedad dentro del empaque es insignificante; es decir, el producto debe tener la mayor resistencia al transporte de vapor de agua, que es el caso de la mayoría de las películas de plástico utilizadas comercialmente en la actualidad (Robertson & Lee, 2021).

La complejidad ya subrayada del problema de la vida útil es bastante grande y resulta tanto del gran número de posibles situaciones diferentes (un mismo producto puede envasarse y almacenarse de varias maneras diferentes) como del hecho de que las condiciones de durabilidad de los envases alimentarios son una función de muchas variables (Piergiovanni & Limbo, 2019). Las variables pueden denominarse composición y propiedades del alimento (F), características del empaque (P) y el ambiente de almacenamiento (E). De hecho, es común y común que un problema de vida útil se represente mediante ecuaciones como (34):

$$SL = f(F_i, P_i, E_i) \quad (34)$$

Donde: SL: vida útil.  $F_i$  : variables alimentarias;  $P_i$  : variables de empaque;  $E_i$  : variables ambientales.

La vida útil de los alimentos se entiende como el tiempo durante el cual se pueden utilizar y mantener su calidad. Los factores extrínsecos, como el medio ambiente (temperatura y la humedad relativa), empaque, junto con las propiedades intrínsecas de los alimentos, determinan el tiempo de conservación (D'Souza et al., 2017). Dependiendo de los propósitos y contextos específicos, la vida útil puede definirse desde diversos puntos de vista (Tabla 3) (Piergiovanni & Limbo, 2019). La definición más común de vida útil es "el tiempo que transcurre desde que se produce y empaqueta un producto hasta que deja de ser aceptable en condiciones ambientales y de comercialización definidas" (Lee et al., 2008).



**Figura 2.** La representación gráfica del estudio de vida útil de un alimento

La vida útil de los alimentos depende de la naturaleza del producto, el método de producción (s), el tipo de embalaje y las condiciones de almacenamiento. Es necesario analizar la interacción entre estos cuatro factores y para lograr la vida útil deseada. Las características para medir la vida útil incluyen cambios químicos (por ejemplo, oxidación de lípidos que conduce a la rancidez), cambios microbiológicos,

cambios en las propiedades organolépticas o pérdida de ciertos nutrientes. Los cambios en las características organolépticas pueden evaluarse mediante análisis químico (por ejemplo, mediante el control de la producción de una sustancia química como la trimetilamina en el pescado) o mediante análisis organoléptico en el que participe un panel de expertos en degustación (Fellows, 2009).

**Tabla 3**

*Definiciones comunes de varios conceptos útiles.*

<b>Tipo de vida útil</b>	<b>Descripción</b>
Vida útil primaria	El tiempo que transcurre desde la fabricación y el envasado del producto hasta el momento en que el producto no puede aceptarse en las condiciones ambientales especificadas.
Vida útil secundaria	El período de tiempo después de abrir el paquete durante el cual el producto alimenticio mantiene un nivel aceptable de calidad.
Vida útil requerida	El tiempo mínimo de almacenamiento que debe garantizar un producto alimenticio para ser rentable en el mercado.
Vida útil máxima	El período máximo de tiempo que puede alcanzar un producto alimenticio, utilizando la mejor solución de envasado disponible.
Vida útil expuesta	El tiempo durante el cual los productos (especialmente los productos frescos, la carne y el pescado) pueden conservarse en determinadas condiciones de exposición de las mercancías.

Fuente: [Piergiovanni & Limbo\( 2019\)](#)

La vida útil de los alimentos es el período durante el cual los alimentos conservan una calidad aceptable desde un punto de vista organoléptico y de seguridad,

y depende de cuatro factores principales, a saber, la formulación, el procesamiento, el envasado y las condiciones de almacenamiento ([Gallagher et al., 2011](#)).

Los fabricantes deben asegurarse de que los productos cumplan con los criterios de seguridad alimentaria, junto con los umbrales de calidad que garanticen la satisfacción del consumidor durante la vida útil etiquetada. La lealtad a la marca y al producto puede verse comprometida si no se cumplen las expectativas del consumidor ([Harcar & Karakaya, 2005](#)). En un intento por reducir este riesgo, los fabricantes tienden a ser más conservadores a la hora de establecer el período máximo de tiempo que se puede almacenar un producto, lo que conduce a una vida útil excesivamente corta ([Newsome et al., 2014](#)). Además, en muchos casos, la necesidad de introducir nuevos productos en el mercado en un plazo breve lleva a las empresas a establecer la vida útil en función de la experiencia previa con productos similares. Estas prácticas pueden conducir a la recuperación temprana de un producto alimenticio del mercado que aún es aceptable para el consumo, desde las perspectivas sensorial, nutricional y de seguridad. De hecho, los datos empíricos muestran que una cantidad considerable de productos se descartan del mercado si no se venden dentro de su vida útil ([Spada et al., 2018](#)). Esto implica consecuencias tanto económicas como ambientales, particularmente dada la necesidad de reducir el desperdicio de alimentos para lograr una transformación sostenible que mantenga el desarrollo humano dentro de límites seguros ([Rockström et al., 2009](#)).

## **2.6 MÉTODOS NUMÉRICOS EN CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS**

Los métodos numéricos son aplicaciones de algoritmos con una serie de pasos (procedimiento) que se plantean para obtener una solución aproximada de un problema. Para el logro del objetivo, se utilizan cálculos puramente aritméticos y lógicos “aproximaciones”. Un algoritmo es un grupo finito de operaciones organizadas y ordenadas que permite solucionar un cierto problema. Se trata de una serie de instrucciones o reglas establecidas que, por medio de una sucesión de etapas, permiten acercar el resultado real del caso.

### 2.6.1 Integración numérica

La integración de una función sobre un límite dado equivale a encontrar el área de la curva funcional entre el límite y el eje de la variable independiente. Una integral definida,  $f(x)$  integrando, desde un límite inferior y hasta un límite superior de la misma cuyos valores deben conocerse (Chandra & Singh, 2017). Así, la integral del método Simpson 3/8 para nuestra investigación es:

El esquema de integración de Simpson 3/8 considera pasar polinomios de tercer grado entre cada cuatro puntos de la función  $y(x)$  y está dado por la ecuación siguiente:

$$I_{3/8} = \frac{3}{8}h(y_0 + 2 \sum y_{multiplo3} + 3 \sum y_{restante} + y_n) \quad (35)$$

Para que la fórmula de Simpson 3/8 sea aplicable  $n$  debe ser múltiplo de 3.

En las ecuaciones la variable  $I$  representa al incremento en la humedad en el alimento,  $h$  representa el incremento constante en el tiempo  $t$  del producto almacenado desde la producción hasta su vencimiento.

Los esquemas de Simpson 1/3 y Simpson 3/8 proporcionan resultados similares, aunque la función corresponda a un polinomio de grado superior a tres; estas dos expresiones son las que producen menores errores en la estimación de la integral, pero hay que tomar en cuenta que tienen restricciones en su aplicación. También se puede calcular el valor de la integral combinando las dos expresiones anteriores, utilizándolas por tramos, en que sean aplicables ([Iriarte, 1990](#); [Luthe et al., 1984](#), [Gerald, 1990](#)).

$$\int_{M_{ini}}^{M_{crit}} f(M) dM = \frac{3h}{8} (f(M_{ini}) + 3 \sum_{i=1,2,4,5}^{n-1} f(M) + 2 \sum_{i=3,6,9}^{n-2} f(M) + f(M_{crit})) \quad (35)$$

$$h = \frac{M_{crit} - M_{ini}}{n}$$

en su forma ampliada es:

$$\int_{M_{ini}}^{M_{crit}} f(M) dM = \frac{3h}{8} [f(M_0) + 3f(M_1) + 3f(M_2) + 2f(M_3) + 3f(M_4) + 3f(M_5) + 2f(M_6) + 3f(M_7) + 3f(M_8) + \dots + f(M_n)] \quad (36)$$

## 2.6.2 Ecuaciones diferenciales ordinarias

En ciencia e ingeniería, al modelar un fenómeno dado, es posible llegar a una ecuación diferencial ordinaria (EDO) cuya solución proporciona información útil

sobre dicho fenómeno. Como en muchos casos de interés EDO puede no tener solución analítica en términos de funciones elementales, o incluso no tener solución analítica, es común recurrir a métodos numéricos para determinar su solución. Tal solución generalmente se da a través de un conjunto de puntos (x, y), donde y es el valor aproximado de la función solución para una x dada (Pereira Da Silva et al., 2006).

Para la investigación realizada la EDO a solucionar es:

$$\frac{dM}{dt} = Wvp \frac{1}{esp} \frac{A}{ms} p_s (aw_{ext} - aw_{int}(M)) \quad (37)$$

donde M es la variable dependiente, t es la variable independiente.

Una ecuación diferencial ordinaria (EDO) muestra la participación de una o más derivadas de una función y no especificada de x, donde la relación también puede involucrar la variable dependiente y misma, funciones de la variable independiente x y constantes. El término ordinario lo separa de la ecuación diferencial parcial (PDE) donde la variable dependiente en su forma derivada es una función simultánea de más de una variable dependiente. Una ecuación diferencial ordinaria puede ser de cualquier orden. Se dice que es de orden n si la n-ésima derivada de la variable dependiente con respecto a la independiente es la derivada más alta en esa ecuación (Chandra & Singh, 2017).

Un método ecuaciones diferenciales ordinarias son soluciones numéricas por aproximaciones iterativos, y que pueden ser explícitos o implícitos, pueden desarrollarse por varios métodos como el de Runge-Kutta (Fletcher, 2017)



## Método Runge-Kutta

Los métodos de Runge-Kutta (RK) logran la exactitud del procedimiento de la serie de Taylor sin necesitar el cálculo de derivadas de orden superior. Existen muchas variantes, pero todas tienen la forma generalizada de la ecuación (Chapra et al., 2011):

$$y_{i+1} = y_i + h * \theta(x_i, y_i, h) \quad (38)$$

Donde  $\theta(x_i, y_i, h)$  se llama función de incremento y se puede interpretar con una inclinación media sobre el intervalo.

Chapra et al. (2011) manifiestan, los métodos de Runge-Kutta son métodos diseñados pensando en imitar las expansiones de Taylor pero usando solo evaluaciones de la función  $f(x, y)$ . El método clásico de Runge-Kutta de orden 4 tiene una función de incremento que coincide con el polinomio de Taylor hasta el sumando con el término  $h^4$ . Este método se puede escribir como,

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= h f(x_n + 0.5h y_n + 0.5k_1) \\ k_3 &= h f(x_n + 0.5h y_n + 0.5k_2) \\ k_4 &= h f(x_n + h y_n + k_3) \\ Y_{n+1} &= Y_n + \frac{h}{6} [k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4] \end{aligned} \quad (39)$$

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Lugar de ejecución**

El presente trabajo de investigación se realizó a finales del 2020 y el transcurso del año 2021 en los ambientes de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, específicamente laboratorio de análisis de alimentos y en el Laboratorio de Farmacia y Biología de la Universidad Nacional de san Cristóbal de Huamanga.

#### **3.2 Tipo de investigación**

Por su finalidad y propósito es experimental aplicada, donde se determinó datos experimentales de humedad de equilibrio del amaranto y la vida útil por simulación numérica de los métodos numéricos.

#### **3.3 Nivel de investigación**

En presente trabajo de investigación de acuerdo a la naturaleza de estudio de trabajar con datos experimentales de laboratorio, luego hacer la simulación y explicar los resultados; es una investigación de nivel experimental, correlacional y explicativo.

#### **3.4 Método de investigación**

El método que se utilizó en el presente trabajo de investigación fue inductivo – deductivo, donde se analizaron el comportamiento de la humedad en almacenamiento. Estas particularidades se generalizaron; si las características físicas varían según las temperaturas y humedad relativa de almacenamiento.

### **3.5 Metodología**

La metodología aplicada en este trabajo, es el método de prototipos; sigue las siguientes etapas: Planteamiento del problema, análisis del contexto, revisión de la literatura, formulación del problema y de los objetivos de la investigación, estructuración del marco teórico de acuerdo al planteamiento del problema, elección y descripción del software, programación de las actividades para el desarrollo de la aplicación; finalmente el análisis y aplicación experimental del prototipo de la aplicación hecha en Excel y Solver.

### **3.6 Materiales y reactivos**

#### **3.6.1 Materiales**

- Harina de amaranto cocido
- Bolsas Doypack transparente con zipper de 16 cm \*24 cm (efectiva 20 cm). Bilaminadas: Polietileno + PET. Espesor= 30  $\mu\text{m}$ . Permeabilidad al vapor de agua = 11.4657 g  $\mu\text{m}/\text{m}^2$  día mmHg
- Diversos materiales de vidrio:
- Desecadores de vidrio de capacidad 5 L.

### 3.6.2 Equipos

- Balanza analítica Ohaus, mod N° APZ105. rango de medición de 0.0001 g de sensibilidad de  $\pm 0.1$  g.
- Estufa de secado para laboratorio, Marca: Memmert, modelo UN750 single display.
- Tamices Tyler (juego de Tamiz standard). Ro-tap-SDILTEST-model CL-313-8 de engineering test equipment.
- Espectrofotómetro: SPECTRONIC 20, UV-VIS Lambda 35, Perkin Elmer.
- Equipo portátil para medición de actividad de agua HYGROPALM HP23-AW-A. rango: 0,000 a 1,000 Aw (0 a 100% de humedad relativa), de 5 a 50 ° C; Resolución de aw de 0,001 Aw (0,1% HR); Precisión actividad del Agua:  $\pm 0,001$  Aw.
- Sellador térmico de 220-240 V, Máquina de sellado manual de bolsas de polietileno de plástico de envoltura de 30 cm, de espesor de sellado de 0.01 a 0.8 mm.
- Equipo centrifuga

### 3.6.3 Reactivos

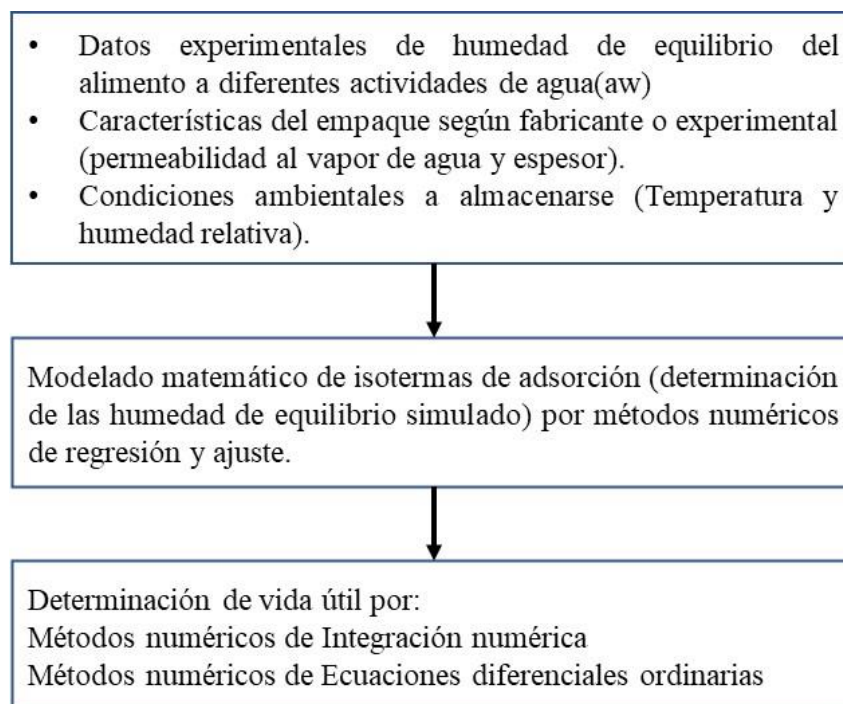
- Hidróxido de potasio
- Yodo
- Yoduro de potasio
- Hidróxido de sodio
- Cloruro de litio

- Bromuro de sodio
- Sulfato de potasio

### 3.7 Diseño de investigación

#### 3.7.1 Diseño experimental

El diseño experimental a seguir es lo que se muestra en la Figura 3.



*Figura 3. Diseño experimental de investigación*

### 3.8 Población y muestra

#### 3.8.1 Población

**La población:** Todo tipo de harinas de amaranto sea a granel y envasado existente en el mercado.

### 3.8.2 Muestra

Muestra, tomada por conveniencia: Harina de amaranto cocido adquirida en el mercado de la localidad, como es mostrado en la Figura 4.



*Figura 4. Muestras de harina de amaranto cocido*

## 3.9 Caracterización de la harina de amaranto cocido

Harina de amaranto cocido fue caracterizado las siguientes propiedades:

### 3.9.1 Determinación de contenido de humedad

El contenido de humedad del producto extruido se determinó secando la muestra en una estufa de aire caliente a 105 °C durante 24 h utilizando el método AOAC (2010).

La técnica por excelencia para cuantificar el contenido de humedad en una muestra, es la determinación gravimétrica. La metodología se fundamenta en someter la harina a calentamiento en una estufa y luego medir la pérdida de peso debido a la volatilización del agua (Pomeranz, 2013). El porcentaje de humedad (% p/p) se expresó como la pérdida de masa de la muestra en unidades porcentuales. Figura 5.

Para evaluar los cambios de humedad durante el almacenamiento a 23 °C, las muestras en su empaque fueron colocadas (3 bolsas) en un ambiente a 23 °C. de estas muestras almacenadas fueron extrayéndose de cada bolsa muestras por mes y analizándose la humedad e índice de peróxido a cada bolsa respectiva. Figura 6.



*Figura 5. Pesado de muestras en la determinación de humedad*



*Figura 6. Muestras en ambientes a temperatura de 23°C y HR constantes.*

### **3.9.2 Determinación de actividad de agua de la harina**

La actividad de agua de las harinas se midió usando un medidor de actividad de agua equipo portátil (Figura 7), HYGROPALM HP23-AW-A. rango: 0,000 a 1,000 Aw (0 a 100% de humedad relativa), de 5 a 50 ° C; Resolución de aw de 0,001 Aw (0,1% HR); Precisión actividad del Agua:  $\pm 0,001$  Aw. Se realizó haciendo la medición directa, se colocó 0.5 g de muestra aproximadamente en la porta muestra del equipo y luego se observándose en unos 3 minutos la lectura respectiva.



*Figura 7. Medición directa de actividad de agua en harina de amaranto cocido*



### 3.9.3 Determinación granulométrica

Para determinar la granulometría de la harina de amaranto cocido se pesaron 100 gramos de harina y fueron colocadas en una batería de tamices conformados de la siguiente manera: Mallas 18 (1 mm), 20(850  $\mu\text{m}$ ), 25(710  $\mu\text{m}$ ), 30(600  $\mu\text{m}$ ), 35(500  $\mu\text{m}$ ), 40(425  $\mu\text{m}$ ), 50(300  $\mu\text{m}$ ), y 70(212  $\mu\text{m}$ ) respectivamente (Figura 8). Luego sometidas a agitación hasta un tiempo (30 minutos) hasta su separación completa en cada tamiz, finalmente se pesó las fracciones de harinas retenidas en cada tamiz y calculado el porcentaje de retención. Se realizaron de tres repeticiones.



*Figura 8. Proceso de tamizado de la muestra en el análisis granulométrico*

### 3.9.4 Determinación de Índice de adsorción de agua (WAI) e índice de solubilidad en agua (WSI) de muestras de harina

Con el fin de determinar el nivel de cambios ocurridos a nivel del almidón durante el proceso de torreado del amaranto antes de obtenerse la harina, se

determinaron los Índice de solubilidad en agua (WAI) e índice de absorción en agua (WSI) en la harina, aplicando la metodología usada por (Bento et al., 2022).

Fueron aplicados los procedimientos descritos usados por (Ma et al., 2021): Se pesaron 1 g (base seca) de harina y colocadas en un Erlenmeyer de 150 mL, las harinas se disolvieron en 20 ml de agua destilad a 30 °C en un termoagitador, y agitaron vigorosamente por 1 min, luego se agitaron a 70 rpm, durante 30 min. Seguido se centrifugó a 3000 rpm por 10 min (Figura 9). Se separó el sobrenadante en placas petri; y luego secado por evaporación a 105 °C en estufa eléctrica, hasta peso constante. Las placas se dejaron enfriar en un desecador, luego se pesaron para obtener los sólidos secos y así calcular el WSI. El sedimento del tubo fue pesado para calcular WAI (ecuación 41).



**Figura 9.** Muestras de tubos después de la sedimentación en la determinación de WSA y WAI

$$\text{WSI} \left( \frac{\text{g}}{100 \text{ g}} \right) = \frac{\text{Peso de solidos en el sobrenadante}}{\text{Peso de la muestra seca}} * 100 \quad (40)$$

$$WAI \left( \frac{g}{g} \right) = \frac{\text{Peso del sedimento}}{\text{Peso del solido seco usado}} \quad (41)$$

### 3.9.5 Determinación de Poder de hinchamiento (SP) de harina de amaranto

WAI<sub>gel</sub>, WSI<sub>gel</sub> y SP para harinas de amaranto gelatinizada, se determinaron según (Ma et al., 2021) con modificaciones. Se pesó 1 g de harina y disuelto en 20 mL de agua destilada a 95 °C y luego se agitó por 30 min. Seguido la mezcla se centrifugó a 3000 x g por 10 min. Después de ello, el sobrenadante se decantó en una placa petri y evaporando a 105 °C hasta peso constante y el sólido seco en el sobrenadante se calculó por diferencia de peso. WAI<sub>gel</sub> y WSI<sub>gel</sub> se calcularon de acuerdo con las ecuaciones (41) y (42), respectivamente. SP se calculó de la siguiente manera:

$$SP \left( \frac{g}{g} \right) = \frac{\text{Peso del sedimento}}{\text{Peso de muestra seca} * (100 - WSI - gel)} \quad (42)$$

### 3.9.6 Determinación de humedad de equilibrio de la harina

Para determinar la estabilidad de humedad frente a diferentes condiciones de humedad relativa, se utilizó el método gravimétrico estático temperatura contante usada por (Tadapaneni, Yang, et al., 2017). Primeramente fueron preparados tres soluciones saturadas de sal como cloruro de litio, bromuro de sodio y sulfato de potasio) (Tabla 4), para producir humedades relativas de 11.0 %, 59.0% y 95 % respectivamente (Aviara, 2020) actividades de agua en rangos de 0.11 a 0.95. Se

eligieron estas tres sales, por ser más estables a la temperatura, muy comerciales y económicas. Se pesaron muestras de harina de amaranto cocido aproximadamente 3 g de harina en lunas de reloj y luego fueron colocados las muestras dentro de los recipientes con humedad relativas preparadas a temperatura constante de 20°C por un periodo de un mes (30 días). Adicional a ello se colocaron dentro de los recipientes solución de tolueno en pequeños recipientes abiertos en cantidades de 75,3% para evitar el crecimiento de hongos y moho en las muestras de la harina. Al cabo del tiempo establecido se pesaron las muestras y determinar la ganancia o pérdida de humedad para cada condición de humedad relativa. Las humeades de equilibrio determinadas fueron expresadas en base seca de 100 g de materia seca.

***Tabla 4***

*Actividades de agua de solución saturada usada para la determinación la humedad de equilibrio a 23 °C.*

<b>Soluciones sobresaturadas</b>	<b>aw</b>
Cloruro de litio	0.11
Bromuro de sodio	0,59
Sulfato de potasio	0.95

Fuente: ([Aviara, 2020](#))

**3.10 Determinación de cambios durante el almacenamiento**



*Figura 10. Desecadores con muestras para determinar humedad de equilibrio.*

### **3.10.1 Determinación de Índice de Peróxido**

El índice de peróxido (IP) es uno de los métodos más usados para medir el nivel de la oxidación lipídica en alimentos. Se basa en la medición de peróxidos. Para la realización de este método, según AOAC (2005), se pesaron 3 g de muestra (con precisión de 0.001 g) en un matraz Erlenmeyer. Se adicionó 10 ml. de cloroformo para disolver las grasas. Luego se agregó 15 ml de solución de yoduro de potasio (KI) al 15%, se mezclaron y se dejaron reposar en un lugar oscuro durante 5 min Se agregó 30 ml de agua destilada y 1ml de indicador de almidón al 0.5%. Luego se tituló con solución de tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) al 0.01N. Por último, realizó una titulación en blanco de los reactivos. Se mezclaron en un matraz Erlenmeyer 10 ml de cloroformo + 15 ml de ácido acético al 5% + 1 ml KI + 30 ml H<sub>2</sub>O. Se agregó 1ml de indicador

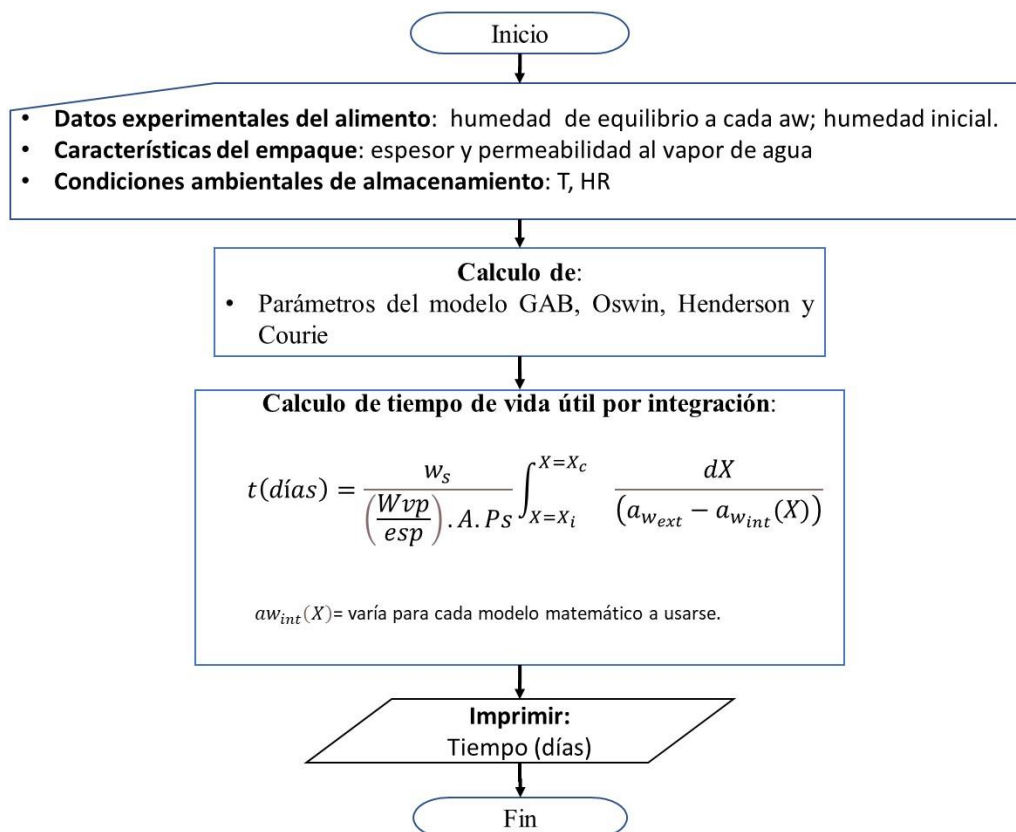
de almidón, luego se tituló la mezcla con tiosulfato de sodio hasta que el color azul desaparezca. Se repitió el proceso de titulación tres veces.

$$IP = \frac{(\text{mL titulados} - \text{mL muestra en blanco}) \times 0.01\text{N tiosulfato de sodio} \times 1000}{\text{Muestra (g)}} \quad (43)$$

El índice de peróxido se mide en: meq de oxígeno disponible/kg. El índice peróxido en alimentos frescos es menor a 10 meq/kg. Si el índice de peróxido está entre 30 - 40 meq/kg, fácilmente se percibe el sabor rancio ([Chakrabarty, 2003](#)).

### **3.11 Predicción de vida útil**

La metodología seguida fue la que se muestra en la Figura 10, en donde se parte de los datos experimentales de humedad de equilibrio (g agua/100 g ms) de la harina cocida de amaranto. Seguidamente a partir de los datos experimentales de humedad de equilibrio se determinaron los parámetros de cada modelo matemático usados para la simulación de isotermas de estabilidad de la harina de amaranto cocido, haciendo uso de los métodos numéricos de regresión cuadrática y lineal. Con los parámetros obtenidos se simuló las humedades de equilibrio de las muestras de harina cocida de amaranto en función de la actividad de agua, se realizaron los análisis de datos experimentales y los valores simulados haciendo uso del cuadrado medio de error (RMSE (%)). Seguidamente se desarrolló la función matemática de actividad de agua como función de humedad de equilibrio y los parámetros de estabilidad para cada modelo matemático en estudio, resultando ecuaciones complejas de integración y ecuación de diferencial ordinaria para cada modelo matemático.



**Figura 11.** Diagrama de flujo del algoritmo del programa para predecir la vida útil de harina de amaranto cocido.

El desarrollo de estas ecuaciones para determinar el tiempo de vida útil, fueron haciéndose uso de los métodos numéricos de integración de Simpson 3/8 y ecuaciones diferenciales ordinarias de Runge-Kutta de cuarto orden, para ello se desarrolló usando el Excel del Office.

### 3.11.1 Determinación de los parámetros de los modelos matemáticos

Se seleccionaron cuatro modelos matemáticos de isoterma para ajustar los datos de sorción de la harina de amaranto cocido para descubrir el modelo mejor ajuste.

Los parámetros (C, k, Mo, A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub>) de los modelos matemáticos se determinaron mediante la herramienta de Solver de Excel del Microsoft office.

a) **Para el modelo matemático de GAB**

$$\frac{a_w}{M} = \frac{1}{M_0 C k} + \frac{(C-2)}{M_0 C} * a_w + \frac{(1-C)K_g}{M_0 C} * a_w^2 \quad (44)$$

Determinar: C, kg, Mo

**Procedimiento**

- 1) Insertar los datos experimentales en las celdas del Excel

	A	B	C	D
1				
2		calculo de constantes de GAB por Solver		
3		x	y	
4		aw	M exp (g agua/100 g ms)	
5		0.11	4.44	
6		0.59	13.146	
7		0.95	46.641	
8				

- 2) Se desea determinar las constantes: Mo, C y kg del modelo matemático

$$M = \frac{M_0 * C * k_g * a_w}{(1 - k_g * a_w)(1 + k_g * a_w (C_g - 1))} \quad (45)$$



- 3) Asignamos valores de  $M_0=1$ ,  $C=1$  y  $K_g= 1$  a las constantes en las celdas, como se observa en la columna F

	A	B	C	D	E	F
1						
2		<b>calculo de constantes de GAB por Solver</b>				
3		<b>x</b>	<b>y</b>			
4		<b>aw</b>	<b>M exp (g agua/100 g ms)</b>		<b>Kg=</b>	<b>1</b>
5		0.11	4.44		<b>C=</b>	<b>1</b>
6		0.59	13.146		<b>Mo=</b>	<b>1</b>
7		0.95	46.641			
8						

- 4) Hacemos el cálculo de la función M ajust

D12     $= (F\$6 * F\$5 * F\$4 * B12) / ((1 - F\$4 * B12) * (1 - F\$4 * B12 + F\$5 * F\$4 * B12))$

	A	B	C	D	E	F
1						
2		<b>calculo de constantes de GAB por Solver</b>				
3		<b>x</b>	<b>y</b>			
4		<b>aw</b>	<b>M exp (g agua/100 g ms)</b>		<b>Kg=</b>	<b>1</b>
5		0.11	4.44		<b>C=</b>	<b>1</b>
6		0.59	13.146		<b>Mo=</b>	<b>1</b>
7		0.95	46.641			
8						
9	solucion					
10						
11		<b>aw</b>	<b>M exp</b>	<b>M ajus GAB</b>		
12		0.11	4.44	0.12360		
13		0.59	13.146	1.43902		
14		0.95	46.641	19.00000		
15						

$$D12 = (F\$6 * F\$5 * F\$4 * B12) / ((1 - F\$4 * B12) * (1 - F\$4 * B12 + F\$5 * F\$4 * B12))$$

Y así para las otras celdas

- 5) Hacemos el cálculo  $(M_{exp} - M_{ajust})^2$  y sumamos dicha columna

	A	B	C	D	E	F
1						
2		<b>calculo de constantes de GAB por Solver</b>				
3		<b>x</b>	<b>y</b>			
4		<b>aw</b>	<b>M exp (g agua/100 g ms)</b>		<b>Kg=</b>	<b>1</b>
5		0.11	4.44		<b>C=</b>	<b>1</b>
6		0.59	13.146		<b>Mo=</b>	<b>1</b>
7		0.95	46.641			
8						
9	solucion					
10						
11		<b>aw</b>	<b>M exp</b>	<b>M ajus GAB</b>	<b>(Mexp-M ajust)^2</b>	
12		0.11	4.44	0.12360	18.631348	
13		0.59	13.146	1.43902	137.053278	
14		0.95	46.641	19.00000	764.024881	
15				<b>SUMA=</b>	<b>919.709507</b>	
16					<b>Celda objetivo</b>	
17					<b>se reduzca a minimo</b>	
18					<b>la diferencia</b>	

La suma aparece en la celda E15

- 6) Colocando el cursor en la celda E15, abrimos la ventana datos y luego Solver, aparece la siguiente ventana.

Debe aparecer la celda a optimizar: **E15**

Debe marcarse la opción de **Min**.

Debe marcarse las celdas que se desean encontrar, en el caso es la celda de la columna **F4 al F6**

7) Luego hacer click en resolver, luego aceptar, y aparece así las celdas

	A	B	C	D	E	F
1						
2		calculo de constantes de GAB por Solver				
3		x	y			
4		aw	M exp (g agua/100 g ms)		Kg=	0.90834
5		0.11	4.44		C=	14.6001
6		0.59	13.146		Mo=	6.46281
7		0.95	46.641			
8						
9		solucion				
10						
11		aw	M exp	M ajust GAB	(Mexp-M ajust)^2	
12		0.11	4.44	4.44048	0.000000	
13		0.59	13.146	13.14641	0.000000	
14		0.95	46.641	46.64076	0.000000	
15				SUMA=	0.000000450	
16					Celda objetivo	
17					se reduzca a minimo	
18					la diferencia	

Como resultado tenemos:

Valores de  $k_g = 0.9083$   $C=14.600$  y  $M_o=6.4628$ , valores encontrados por iteraciones de optimización, la celda F4, F5 y F6 ha cambiado

**b) Para el modelo Oswin**

Se siguió el mismo procedimiento que para el método de GAB

$$\ln\left(\frac{M}{A_1}\right) = B_1 + \frac{Aw}{(1 - Aw)} \tag{46}$$

Se determinan  $A_1$  y  $B_1$

**c) Para el modelo de Henderson**

Se siguió el mismo procedimiento que para el método de GAB

$$\ln(1 - aw) = B_2 - B_2 M \quad (47)$$

Se determinan  $B_2$  y  $B_2$

d) **Para el modelo Caurie**

Se siguió el mismo procedimiento que para el método de GAB

$$\ln(M) = A_3 + B_3 aw \quad (48)$$

Se determinan  $A_3$  y  $B_3$

### 3.11.2 Cálculo de humedad de equilibrio (isoterma de adsorción) simulado

Con los parámetros obtenidos para cada modelo matemático en el ítem anterior, se reemplazaron en dichos modelos y se determinará la humedad ( $M$ ) en función de actividad de agua desde 0 hasta 1 como máximo, se determinó para un intervalo de  $aw$  de 0 a 0.95.

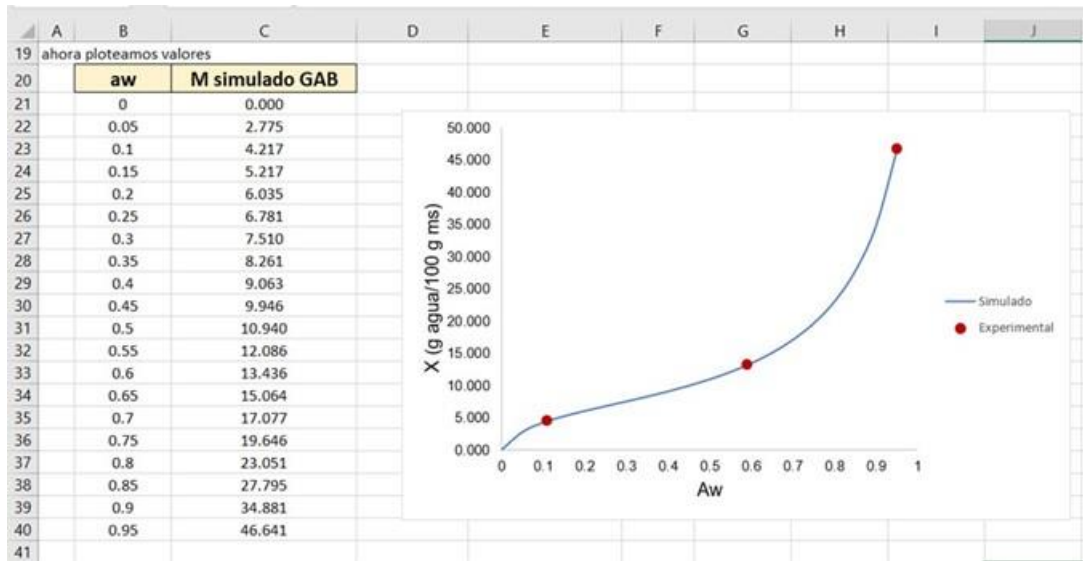
**Para el modelo GAB**

$$aw_{int}(M) = \left( \frac{(2 + ((M_0/M) - 1) * C) - [(2 + ((M_0/M) - 1) * C)^2 - 4 + 4 * C]^{0.5}}{2 * kg * (1 - C)} \right) \quad (49)$$

De la misma manera se determinó para los otros modelos matemáticos

Para el modelo **Oswin**

$$M = A_1 \left[ \frac{Aw}{(1 - Aw)} \right]^{B_1} \quad (50)$$



Para el modelo de **Henderson**

$$1 - aw = \exp(-B_2 M^{B_2}) \quad (51)$$

Para el modelo **Caurie**

$$M = \exp(A_3 + B_3 aw) \quad (52)$$

### 3.11.3 Vida útil estimada

La aplicación de la integración numérica a los modelos matemáticos que involucran la característica de isoterma de estabilidad de la harina de amaranto cocido obtenido experimentalmente en laboratorio, la permeabilidad al vapor de agua del empaque, tamaño de empaque y cantidad de producto dentro del empaque, condiciones

de almacenamiento (Temperatura ambiental y la humedad relativa) fueron desarrolladas realizando la integración numérica de Simpson tres octavos para los modelos de GAB, Oswin, Henderso y Caurie; el programa que fue desarrollado en el Excel del Microsoft office, la función matemática siguiente:

$$t_{(días)} = \frac{esp \ ms}{Wvp \ A \ p_s} \int_{M_i}^{M_c} \frac{dM}{\left(\frac{HR}{100} - aw \ int(M)\right)} \quad (53)$$

Donde:

$aw \ int(M)$  : es la actividad de actividad de agua en función de la variación de humedad de equilibrio.

$Wvp$  : Permeabilidad al vapor de agua ( $g \ \mu m \ d^{-1} \ m^{-2} \ mmHg^{-1}$ ) del empaque

$esp$  : Espesor de la película ( $\mu m$ ),

$A$  : Área de la superficie del empaque ( $m^2$ ),

$Ms$ : Masa seca de harina de amaranto cocido (g),

$p_s$  : es la presión de vapor de agua de saturación a cualquier temperatura ambiental (mmHg),

$HR$ : Humedad relativa de la atmósfera ambiental (%).

Se aplicaron para los modelos matemáticos siguientes:

El modelo **GAB** es:

$$t_{(días)} = \frac{esp \ ms}{Wvp \ 100 \ A \ p_s} \int_{M_i}^{M_c} \frac{dM}{(awe - aw \ int(M))} \quad (54)$$

La humedad en función de los parámetros del modelo matemático de GAB es:

$$M = \frac{M_0 * C_g * k_g * a_w}{(1 - k_g * a_w)(1 + k_g * a_w (C_g - 1))} \quad (55)$$

La actividad de agua del alimento en función de la humedad para el modelo de GAB es;

$$a_{w_{int(M)}} = \left( \frac{((2 + ((M_0 / M) - 1) * C) - ((2 + ((M_0 / M) - 1) * C)^2 - 4 + (4 * C))^{0.5}}{2 * K_g * (1 - C)} \right) \quad (56)$$

**Procedimiento de desarrollo cálculo de vida útil de para el modelo de GAB, a través de los métodos numéricos de integración del método iterativo de Simpson 3/8 en Excel**

(1) Realizamos la estructura siguiente en el Excel

- Colocamos en las celdas respectivas los nombres y los datos del empaque del producto y condiciones ambientales de almacenamiento que usaremos.
- En algunos casos haremos los cálculos (celdas azules)

	A	B	C	D	E
1					
2	Constantes de GAB				
3	Viene de la hoja 1				
4		K=	0.9083		
5		C=	14.6001		
6		Xm=	6.4628		
7					
8		T(°C)=	23		
9		Pm=	11.4057		
10		A(m2)=	0.0312		
11		esp(um)=	30		
12		Ps (mmHg)=	21.24444802		
13		Aw externa=	0.75		
14		peso (g)=	250		
15		Hi(%)=	2.345	2.4013	g/100 g ms
16		H critica(%)=	12	13.6364	g/100 g ms
17		Ms(g)=	244.138		
18		B(ws*esp/(pm*10*A)=	9.688		
19					
20		A=11.5 cm * 17 cm			
21		Ps=1132570000*exp(-5269/(T+273.15))			

- (2) Confeccionamos los nombres de las celdas a trabajar (fila 39), introduciendo la celda de n= número de datos a usarse y  $h=(M_{cri}-M_{ini})/n$

	J	K	L	M	N
36	n=	48			
37	h=	0.2341			
38					
39	<b>i</b>	<b>M (humedad)</b>	<b>f(M)</b>	<b>Factor</b>	<b>f(M)*factor</b>

- (3) Hacemos i= iteraciones, M será la humedad inicial del alimento, y calculamos la función f(M) será:

$$f(M) = \frac{1}{\left(\frac{HR}{100} - aw_{int}(M)\right)}$$

Y la  $aw_{int}(M)$  en a función será:

$$aw_{int(M)} = \left( \frac{((2 + ((M_o / M) - 1) * C) - ((2 + ((M_o / M) - 1) * C) ^ 2 - 4 + (4 * C)) ^ 0.5)}{2 * Kg * (1 - C)} \right) \quad (57)$$

En el Excel quedara de la siguiente forma (solo hasta la comuna F)

	J	K	L	M	N
36	n=	48			
37	h=	0.2341			
38					
39	<b>i</b>	<b>M (humedad)</b>	<b>f(M)</b>	<b>Factor</b>	<b>f(M)*factor</b>
40	0	2.401	1.40940962	1	1.409
41	1	2.635	1.42106598	3	4.263
42	2	2.869	1.43387931	3	4.302
43	3	3.104	1.44799333	2	2.896
44	4	3.338	1.46356893	3	4.391
45	5	3.572	1.48078491	3	4.442
46	6	3.806	1.49983805	2	3.000
47	7	4.040	1.52094236	3	4.563
48	8	4.274	1.54432715	3	4.633
49	9	4.508	1.57023379	2	3.140
50	10	4.742	1.59891107	3	4.797
51	11	4.976	1.63060936	3	4.892



Para la fila 40 será

$$K40 = D15 \text{ humedad inicial del alimento}$$

$$L40 = 1 / (C\$13 - (((2 + ((C\$6 / K40) - 1) * C\$5) - ((2 + ((C\$6 / K40) - 1) * C\$5) ^ 2 - 4 + (4 * C\$5)) ^ 0.5) / (2 * C\$4 * (1 - C\$5))))$$

Para la fila 41 será

$$J41 = K40 + K\$37$$

$$K41 = K40 + K\$37$$

(4) Luego completamos las columnas de J , K y L, quedando así:

	J	K	L	M	N
39	i	M (humedad)	f(M)	Factor	f(M)*factor
40	0	2.401	1.40940962	1	1.409
41	1	2.635	1.42106598	3	4.263
42	2	2.869	1.43387931	3	4.302
43	3	3.104	1.44799333	2	2.896
44	4	3.338	1.46356893	3	4.391
45	5	3.572	1.48078491	3	4.442
46	6	3.806	1.49983805	2	3.000
47	7	4.040	1.52094236	3	4.563
48	8	4.274	1.54432715	3	4.633
49	9	4.508	1.57023379	2	3.140
50	10	4.742	1.59891107	3	4.797
51	11	4.976	1.63060936	3	4.892
52	12	5.210	1.66557384	2	3.331
53	13	5.444	1.70403774	3	5.112
54	14	5.678	1.74621617	3	5.239
55	15	5.912	1.7923017	2	3.585
56	16	6.146	1.84246215	3	5.527
57	17	6.380	1.89684109	3	5.691
58	18	6.614	1.95556088	2	3.911
59	19	6.849	2.01872762	3	6.056
60	20	7.083	2.08643753	3	6.259
61	21	7.317	2.15878373	2	4.318
62	22	7.551	2.23586302	3	6.708
63	23	7.785	2.31778211	3	6.953
64	24	8.019	2.40466301	2	4.809
65	25	8.253	2.49664777	3	7.490
66	26	8.487	2.59390249	3	7.782
67	27	8.721	2.69662074	2	5.393

- (5) Creamos la comuna M de acuerdo a los coeficientes del algoritmo de Simpson 3/8 como es:

$$\int_{M_{ini}}^{M_{crit}} f(M) dM = \frac{3h}{8} [f(M_0) + 3f(M_1) + 3f(M_2) + 2f(M_3) + 3f(M_4) + 3f(M_5) + 2f(M_6) + 3f(M_7) + 3f(M_8) + \dots + f(M_n)] \quad (58)$$

No olvidarse que numero de datos tiene que ser múltiplo de 3 (columna J)

Procedemos a llenar la columna M como: 1 3 3 2 3 3 2 ..... 1 (el ultimo debe ser 1

- (6) Luego calculamos la columna N: columna N\* columna M

- (7) Realizamos el cálculo de la integral como:

La integral es:

$$\int_{Mini}^{M_{crit}} f(M) dM = \frac{3 * h}{8} [Suma de la columna N]$$

	J	K	L	M	N	O	P	Q
38								
39	<b>i</b>	<b>M (humedad)</b>	<b>f(M)</b>	<b>Factor</b>	<b>f(M)*factor</b>		<b>Integral=</b>	<b>33.207</b>
40	0	2.401	1.40940962	1	1.409			
41	1	2.635	1.42106598	3	4.263		<b>vida util(dias)=</b>	<b>321.71</b>
42	2	2.869	1.43387931	3	4.302			
43	3	3.104	1.44799333	2	2.896			
44	4	3.338	1.46356893	3	4.391			
45	5	3.572	1.48078491	3	4.442			
46	6	3.806	1.49983805	2	3.000			
47	7	4.040	1.52094236	3	4.563			
48	8	4.274	1.54432715	3	4.633			
49	9	4.508	1.57023379	2	3.140			
50	10	4.742	1.59801107	3	4.782			

Q39=SI(RESIDUO(K36;3)=0; (3\*K37\*(SUMA(N40:N88))/8); "n No es multiplo de 3")

Agregándole una condicional si se olvidaran en el número de datos

(8) La vida útil será como

$$t_{(días)} = \frac{esp\ ms}{Wvp\ 100\ A\ p_s} \int_{M_i}^{M_c} \frac{dM}{(awe - aw\ int(M))} \quad (59)$$

Ahora multiplicamos la integral determinada por  $\frac{esp\ ms}{Wvp\ 100\ A\ p_s}$  se tiene el resultado que aparece en la celda C18.

Vida útil= 321.71 días

Los mismos procedimientos se siguieron para los modelos de Oswin, Henderson y Caurie

Para modelo **Oswin**

$$t_{(días)} = \frac{esp\ ms}{Wvp\ A\ p_s} \int_{M_{ini}}^{M_{cri}} \frac{dM}{aw_{ext} \frac{1}{[(A*M)^{1/B} + 1]}} \quad (60)$$

Para modelo **Henderson**

$$t_{(días)} = \frac{esp\ ms}{Wvp\ A\ p_s} \int_{M_{inicial}}^{M_{critica}} \frac{dM}{(aw_{ext} - (1 + \exp(-A_1 M^{B_1})))} \quad (61)$$

Para modelo **Caurie**

$$t_{(días)} = \frac{esp\ ms}{Wvp\ A\ p_s} \int_{M_{inicial}}^{M_{critica}} \frac{dM}{(aw_{ext} - \frac{\ln(M) - A_2}{B_2})} \quad (62)$$

### 3.11.4 Estimación de humedad en almacenamiento

Para evaluar el comportamiento de la humedad dentro del alimento en función del tiempo, usaremos las ecuaciones del 54 al 57, haciendo uso de los métodos numéricos de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO), como el de Runge-Kutta de cuarto orden, donde estimaremos la humedad (M) en cada tiempo (dt), para los modelos matemáticos siguientes:

Para el modelo **GAB**

$$\frac{dM}{dt} = Wvp \frac{1}{esp} \frac{A}{ms} p_s \left( aw_{ext} - \left( \frac{(2+((M_0/M)-1)*C)-[(2+((M_0/M)-1)*C]^2-4+4*C)^{0.5}}{2*kg*(1-C)} \right) \right) \quad (63)$$

#### Procedimiento

- (a) Realizamos la estructura siguiente en el Excel
  - Colocamos en las celdas respectivas los nombres y los datos del empaque del producto y condiciones ambientales de almacenamiento que usaremos.
  - En algunos casos haremos los cálculos (celdas azules)

	A	B	C	D	E
1					
2	Constantes de GAB				
3	Viene de la hoja 1				
4		K=	0.9083		
5		C=	14.6001		
6		Xm=	6.4628		
7					
8		T(°C)=	23		
9		Pm=	11.4057		
10		A(m2)=	0.0312		
11		esp(um)=	30		
12		Ps (mmHg)=	<b>21.24444802</b>		
13		Aw externa=	0.75		
14		peso (g)=	250		
15		Hi(%)=	2.345	<b>2.4013</b>	g/100 g ms
16		H critica(%)=	12	<b>13.6364</b>	g/100 g ms
17		Ms(g)=	<b>244.138</b>		
18		B(ws*esp/(pm*10*A*	<b>9.688</b>		
19					
20		A=11.5 cm * 17 cm			
21		<b>Ps=1132570000*exp(-5269/(T+273.15))</b>			

(b) El algoritmo a usarse del método EDO de Runge-Kutta de 4 orden es:

$$k_1=f(x_0,y_0)$$

$$k_2=f(x_0+h/2,y_0+h/2*k_1)$$

$$k_3=f(x_0+h/2, y_0+h*k_2/2)$$

$$k_4=f(x_0+h, y_0 +h*k_3)$$

$$Y_{n+1} = Y_n + \frac{h}{6} [k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4]$$

(c) Preparamos los nombres de las celdas a usarse de la siguiente manera

138							
	A	B	C	D	E	F	G
35							
36		$h=(x_n-x_0)/n=$	5				
37		BB=	0.10322				
38		<b>Tiempo</b>	<b>Humedad</b>				
39	<b>i</b>	<b><math>x_i=dt</math></b>	<b><math>y_i=fx</math></b>	<b><math>f(x_i,y_i)</math></b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>

- (d) Introducimos los valores iniciales de tiempo y Humedad, como también la variación del tiempo (cada 5 días), también calculamos la función de EDO en la columna D.

Para simplificar llamamos

$$BB = Wvp \frac{1}{esp} \frac{A}{ms} p_s$$

$$\frac{dM}{dt} = BB \left( aw_{ext} - \left( \frac{(2 + ((M_0/M) - 1) * C) - [(2 + ((M_0/M) - 1) * C)^2 - 4 + 4 * C]^{0.5}}{2 * kg * (1 - C)} \right) \right) \quad (64)$$

También calculamos k1, k2, k3 y k4 en la fila 40

	A	B	C	D	E	F	G
35							
36		$h=(x_n-x_0)/n=$	5				
37		BB=	0.10322				
38		<b>Tiempo</b>	<b>Humedad</b>				
39	<b>i</b>	<b><math>x_i=dt</math></b>	<b><math>y_i=fx</math></b>	<b><math>f(x_i,y_i)</math></b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>
40	0	0	2.4013	0.073	0.0732	0.0728	0.0728

Las celdas serian así:

$$D40 = C\$37 * (C\$13 - (((2 + ((C\$6 / C40) - 1) * C\$5) - ((2 + ((C\$6 / C40) - 1) * C\$5) ^ 2 - 4 + (4 * C\$5) ^ 0.5) / (2 * C\$4 * (1 - C\$5))))$$

$$E40 = D40$$

$$F40 = \frac{C\$37 * (C\$13 - (((2 + ((C\$6 / (C40 + 0.5 * C\$36 * E40)) - 1) * C\$5) - ((2 + ((C\$6 / (C40 + 0.5 * C\$36 * E40)) - 1) * C\$5) ^ 2 - 4 + (4 * C\$5) ^ 0.5) / (2 * C\$4 * (1 - C\$5))))))}{(2 * C\$4 * (1 - C\$5))}$$

$$G40 = \frac{C\$37 * (C\$13 - (((2 + ((C\$6 / (C40 + 0.5 * C\$36 * F40)) - 1) * C\$5) - ((2 + ((C\$6 / (C40 + 0.5 * C\$36 * F40)) - 1) * C\$5) ^ 2 - 4 + (4 * C\$5) ^ 0.5) / (2 * C\$4 * (1 - C\$5))))))}{(2 * C\$4 * (1 - C\$5))}$$

$$H40 = \frac{C\$37 * (C\$13 - (((2 + ((C\$6 / (C40 + C\$36 * G40)) - 1) * C\$5) - ((2 + ((C\$6 / (C40 + C\$36 * G40)) - 1) * C\$5) ^ 2 - 4 + (4 * C\$5) ^ 0.5) / (2 * C\$4 * (1 - C\$5))))))}{(2 * C\$4 * (1 - C\$5))}$$

(e) Cálculo de la fila 41

	A	B	C	D	E	F	G	H
35								
36		$h=(x_n-x_0)/n=$	5					
37		BB=	0.10322					
38		<b>Tiempo</b>	<b>Humedad</b>					
39	<b>i</b>	<b>xi=dt</b>	<b>yi =fx</b>	<b>f(xi,yi)</b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>	<b>k4</b>
40	0	0	2.4013	0.073	0.0732	0.0728	0.0728	0.0723
41	1	5	2.7652	0.072	0.0723	0.0718	0.0718	0.0712

$$B41 = B40 + 1$$

$$\text{Calculamos: } Y_{n+1} = Y_n + \frac{h}{6} [k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4]$$

$$C41 = C40 + C\$36 * (E40 + 2 * F40 + 2 * G40 + H40) / 6$$

D41 será en función de C41, para ello solo deslizamos la celda D40

Lo mismo con las celdas E41, F41, G41 y H41

(f) Hacemos los cálculos hasta llegar a la humedad final o crítica

Para ello deslizamos hacia abajo toda la fila41 en bloque y tenemos

	A	B	C	D	E	F	G	H
38		<b>Tiempo</b>	<b>Humedad</b>					
39	<b>i</b>	<b>xi=dt</b>	<b>yi =fx</b>	<b>f(xi,yi)</b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>	<b>k4</b>
40	0	0	2.4013	0.073	0.0732	0.0728	0.0728	0.0723
41	1	5	2.7652	0.072	0.0723	0.0718	0.0718	0.0712
42	2	10	3.1240	0.071	0.0712	0.0706	0.0707	0.0700
43	3	15	3.4772	0.070	0.0700	0.0694	0.0694	0.0687
44	4	20	3.8242	0.069	0.0687	0.0680	0.0681	0.0673
45	5	25	4.1644	0.067	0.0673	0.0666	0.0666	0.0658
46	6	30	4.4973	0.066	0.0658	0.0650	0.0650	0.0641
47	7	35	4.8221	0.064	0.0641	0.0633	0.0633	0.0624
48	8	40	5.1385	0.062	0.0624	0.0615	0.0615	0.0606
49	9	45	5.4459	0.061	0.0606	0.0596	0.0596	0.0587
50	10	50	5.7440	0.059	0.0587	0.0577	0.0577	0.0568
51	11	55	6.0327	0.057	0.0568	0.0558	0.0558	0.0549
52	12	60	6.3119	0.055	0.0549	0.0539	0.0540	0.0530
53	13	65	6.5817	0.053	0.0530	0.0521	0.0521	0.0512
54	14	70	6.8421	0.051	0.0512	0.0503	0.0503	0.0494
55	15	75	7.0935	0.049	0.0494	0.0485	0.0485	0.0477
56	16	80	7.3362	0.048	0.0477	0.0468	0.0469	0.0460
57	17	85	7.5704	0.046	0.0460	0.0452	0.0452	0.0445
58	18	90	7.7966	0.044	0.0445	0.0437	0.0437	0.0430
59	19	95	8.0151	0.043	0.0430	0.0422	0.0422	0.0415
60	20	100	8.2262	0.042	0.0415	0.0408	0.0408	0.0402
61	21	105	8.4304	0.040	0.0402	0.0395	0.0395	0.0389
62	22	110	8.6280	0.039	0.0389	0.0383	0.0383	0.0377
63	23	115	8.8193	0.038	0.0377	0.0371	0.0371	0.0365
64	24	120	9.0046	0.036	0.0365	0.0359	0.0359	0.0354
65	25	125	9.1843	0.035	0.0354	0.0349	0.0349	0.0343

El tiempo en el que se acerca a la humedad crítica de 13.6364 es aproximadamente de 320 días.

El mismo procedimiento se siguió para los métodos de Oswin, Henderson y Caurie

Para el modelo de **Oswin**

$$\frac{dX}{dt} = Wvp \frac{1}{esp} \frac{A}{ms} p_s \left( aw_{ext} - \left(\frac{X}{A}\right)^{1/B} / \left[1 + \left(\frac{X}{A}\right)^{1/B}\right] \right) \quad (65)$$

Para el modelo de **Henderson**



$$\frac{dX}{dt} = Wvp \frac{1}{esp} \frac{A}{ms} p_s \left( aw_{ext} - \left( 1 + \exp \left( (-B_2) X_e^{B_1} \right) \right) \right) \quad (66)$$

Para el modelo **Caurie**

$$\frac{dX}{dt} = Wvp \frac{1}{esp} \frac{A}{ms} p_s \left( aw_{ext} - \left( \frac{\ln(X_e) - A_2}{B_2} \right) \right) \quad (67)$$

### 3.12 Análisis de datos

Para evaluar el coeficiente de regresión lineal y cuadrático fue usado el R-cuadrado. El R-cuadrado es una medida estadística de qué tan cerca están los datos de la línea de regresión ajustada. También se conoce como coeficiente de determinación, o coeficiente de determinación múltiple si se trata de regresión múltiple. El R-cuadrado siempre está entre 0 y 1; 0 indica que el modelo no explica ninguna porción de la variabilidad de los datos de respuesta alrededor de su media; 1 indica que el modelo explica toda la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media

El criterio para evaluar la calidad de ajuste de los modelos fue el coeficiente de determinación del porcentaje de error cuadrático medio (RMSE %). El RMSE (%) se calculó usando la expresión:

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{(M_{exp} - M_{pred})^2}{M_{exp}} \right)}{n}} * 100 \quad (68)$$

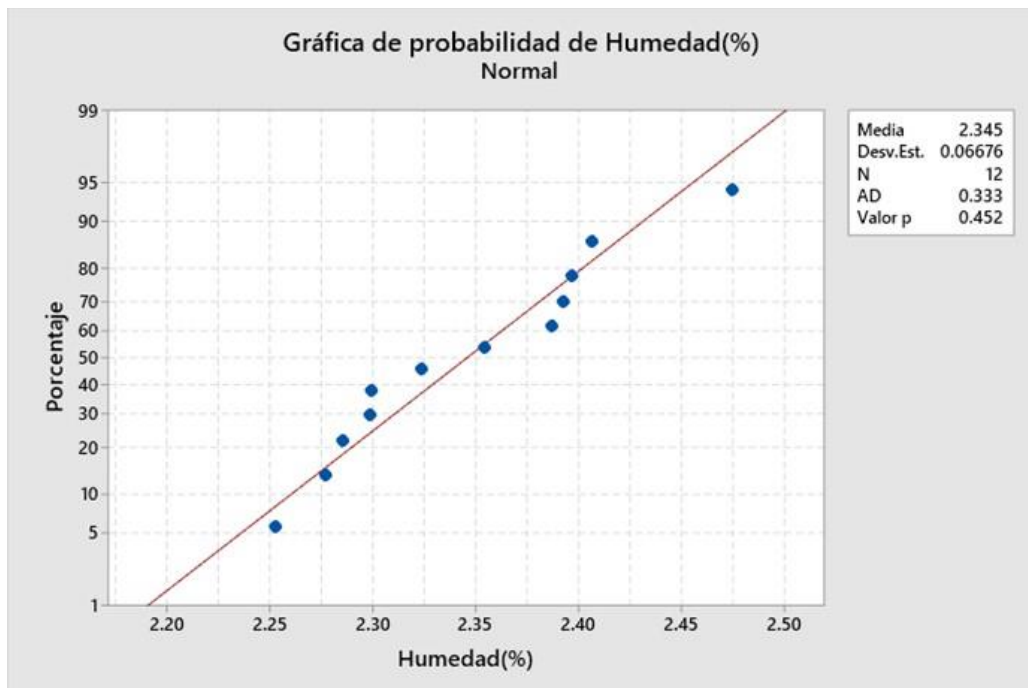
Donde  $M_{exp}$  y  $M_{pred}$  son los contenidos de humedad de equilibrio determinados experimentalmente y predichos a partir de los modelos de sorción, respectivamente, en  $a_w(i)$ , y  $n$  es el número de puntos de datos.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA HARINA DE AMARANTO COCIDO

#### 4.1.1 Características físico-químicas y funcionales

La harina de amaranto cocida fue adquirida en el mercado local de la ciudad de Huamanga producto empacados en tamaños de 250 g para el caso en estudio. En la Figura 12 se muestra la grafica de probabilidad de distribución de contenido de humedad en la harina de amaranto cocido



*Figura 12. Resultado de grafica de probabilidad de distribución de contenido de humedad en las muestras de harina de amaranto cocido usados.*

En esta Figura 12 observamos se tiene un valor-p = 0.452 mayor a 0.05; donde podemos afirmar que las muestras usadas presentan una homogeneidad en el contenido de humedad, y no existe diferencia significativa entre el contenido de humedad entre las muestras usados en la investigación.

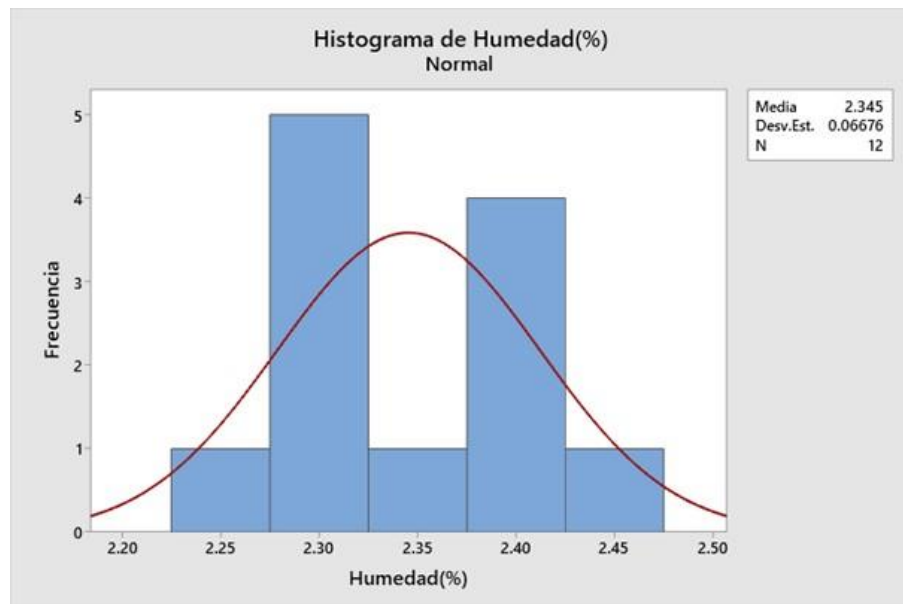


Figura 13. Grafica de histograma distribución de contenido de humedad en la harina de amaranto cocido.

La humedad promedio en las harinas usadas fue de 2.345, como se observa en la Figura 13. El contenido de humedad fue determinado con la finalidad de conocer como el punto de inicio para el proceso de almacenamiento, a partir de esta humedad se evaluó los cambios durante el almacenamiento, hasta llegar a la humedad máxima (establecido en las normas peruanas) o humedad crítica. El contenido de humedad es uno de los parámetros de mayor interés entre los que regulan la calidad de los granos y sus productos derivados, influye de manera determinante en su conservación o resistencia al deterioro (Bianco D et al., 2014).

En la Tabla 5 se presentan los resultados de las características de la harina de amaranto cocido, como contenido de humedad, actividad de agua, índice de peróxido; sus propiedades funcionales de Índice de adsorción en agua, Índice de solubilidad en agua y Poder de hinchamiento.

Los valores de las propiedades funcionales de la harina de amaranto cocido como de índice de solubilidad en agua (WSI), índice de adsorción (WAI) y del poder de hinchamiento (SP) se observan en la Tabla 5. Los valores de los índices de solubilidad en agua (WSI) de la harina de amaranto cocido presenta valores de  $10.3 \pm 4.078$ . Similares valores reportan (Dussán-Sarria et al., 2019) reportan en harina de quinua de WSI de  $11.18 \pm 0.49\%$ ; (Rodríguez-Sandoval et al., 2012) reportaron un valor de WSI de  $5,10\%$  en la quinua variedad *Tuncahuán* y un valor de 2.09 en la harina de trigo. (García Jiménez & Vázquez, 2016) indican que el WSI es un parámetro directamente proporcional a la cantidad de sólidos que son disueltos por el agua, que a su vez se relaciona con el grado de secado de la harina, al ser este un factor crítico ya que un tiempo de secado largo rompe las cadenas del almidón y genera cadenas cortas que retienen mayor número de moléculas de agua, disminuye la cohesividad y la plasticidad de las pastas. [Njintang & Mbofung\( 2006\)](#) argumentan que aunque el secado a alta temperatura es muy efectivo, este proceso afecta la calidad del producto en términos de color, desempeño y polvo durante el procesamiento.

El contenido de humedad en la harina de amaranto cocido por torreado presenta un valor de 2.43 %, similar valor reporta ([Liu et al., 2022](#)), en productos como la harina

de amaranto horneada (1,96 %) en harina de amaranto sin tratar (9,33 %) y la harina de amaranto cocida a chorro (8,05 %).

**Tabla 5**  
*Características físico-químicas y funcionales de harina de amaranto cocido*

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>
	2.43 % bh
Humedad	2.4905 (g agua 100 g <sup>-1</sup> ms)
Actividad de agua (aw)	0.168 ± 0.002
Índice de peróxido	1.9 ± 0.01
Índice de adsorción en agua (WAI) (g/g)	2.681 ± 0.217
Índice de solubilidad en agua (WSI) (g/100 g)	10.300 ± 4.078
Índice de adsorción en agua -gel WAI-gel (g/g)	10.198 ± 0.114
Índice de solubilidad en agua -gel WSI-gel (g/100 g)	9.2 ± 2.008
Poder de hinchamiento (g/g)	2.01 ± 0.001

bh: base húmeda

El contenido de humedad óptimo para conservar un alimento deshidratado, es aquel que corresponde a la mínima entropía integral del sistema, ya que en este estado termodinámico el agua tiene menos disponibilidad para participar en reacciones de

degradación (Azuara & Beristain, 2006; Rascón et al., 2011; Viganó et al., 2012; Viveros-Contreras et al., 2013). Este punto es considerado como el máximo orden de las moléculas de agua adsorbidas en la microestructura del alimento; no obstante, algunas veces no corresponde con el valor de monocapa que se ha utilizado como parámetro de máxima estabilidad de los alimentos (Bonilla et al., 2010; Guadarrama-Lezama et al., 2014).

Se observa además en la Tabla 5 una actividad de agua de 0.168, una actividad muy baja, este resultado no garantiza la calidad de conservación de la harina. El polietileno es el material de empaque adecuado para el envasado de harinas basado en su actividad de agua. La actividad del agua es uno de los predictores para evaluar la calidad de los alimentos y la vida útil según el contenido de humedad (Li et al., 2017b). La actividad del agua depende de los cambios físicos, químicos y biológicos de la harina (Maltini et al., 2003). Los alimentos caracterizados por su baja actividad de agua ( $a_w < 0,6$ ) se caracterizan por poseer una vida útil prolongada (Sakač et al., 2016). Se recomienda el almacenamiento de harinas a baja humedad y una actividad de agua baja. Se debe tener cuidado de no almacenar harinas en condiciones que modifiquen sus humedades, ya que esto podría predisponer a la harina a cambios bioquímicos que conduzcan a cambios organolépticos irreversibles (Abdullah et al., 2000).

El valor del índice de absorción de agua (WAI) en la harina de amaranto cocido fue  $2.681 \pm 0.217$ , similar a lo reportado por (Rodríguez-Sandoval et al., 2012) que reportaron un valor de WAI de 2,31 en la quinua variedad *Tuncahuán*. El valor del

poder de hinchamiento (SP) fue de  $2.01 \pm 0.001$ . (Rodríguez-Sandoval et al., 2012) reportó un valor similar de SP de 2,43 en la quinua variedad Tuncahuán.

Los mayores valores de WAI y SP de la harinas, inducen que esta la harina presenta una mayor capacidad de gelatinización, estos parámetros muestran la magnitud de la interacción entre las cadenas de almidón dentro de las secciones amorfas y cristalinas (Dussán-Sarria et al., 2019). La gelatinización de los almidones contenidos en las harinas de origen vegetal, influye en las propiedades funcionales de estas y es responsable del aumento de la solubilidad, absorción de agua y el poder de hinchamiento, estas interacciones a su vez son afectadas por la relación amilosa/amilopectina y por las características de la amilosa y la amilopectina, en términos del peso/distribución, grado y longitud de ramificación y conformación (Rodríguez-Sandoval et al., 2012).

La gelatinización es causada por la acción del calor y del agua en la desestabilización y reorganización de la estructura granular del almidón, esto favorece el hinchamiento de los gránulos de almidón, una harina de origen vegetal con elevado contenido de almidón, en exceso de agua caliente ocasiona la difusión de una parte de la amilasa desde el granulo hacia la fase liquida y se gelatiniza (Damodaran et al., 2007; García Jiménez & Vázquez, 2016). Los gránulos de almidón, cuando son calentados en agua, se gelatinizan y sucede una alteración del orden molecular, lo que conduce a pérdidas de cristalinidad y a un aumento en la capacidad de unirse al agua (Njintang & Mbofung, 2006). Esta connotación es importante para la industria debido



a que se busca que las pastas aumenten su volumen después de la cocción por la absorción de agua ([García Jiménez & Vázquez, 2016](#)).

#### **4.1.2 Granulometría de la harina**

En la Tabla 6 y Figura 14, se observan los resultados del análisis del tamizado de la harina de amaranto cocido. En el primer tamiz de malla 18 no hubo retención de harinas ya que la abertura del tamiz era mayor al diámetro de las partículas. En las mallas 20, 25 y 30 las retenciones fueron mínimos menores al 1%, mientras en las mallas 35, 4, 50 y 70 fueron mayores al 1% y menores del 7.5 %, siendo el mayor porcentaje de masa (82.52 %) en tamaños menores a 212  $\mu\text{m}$ .

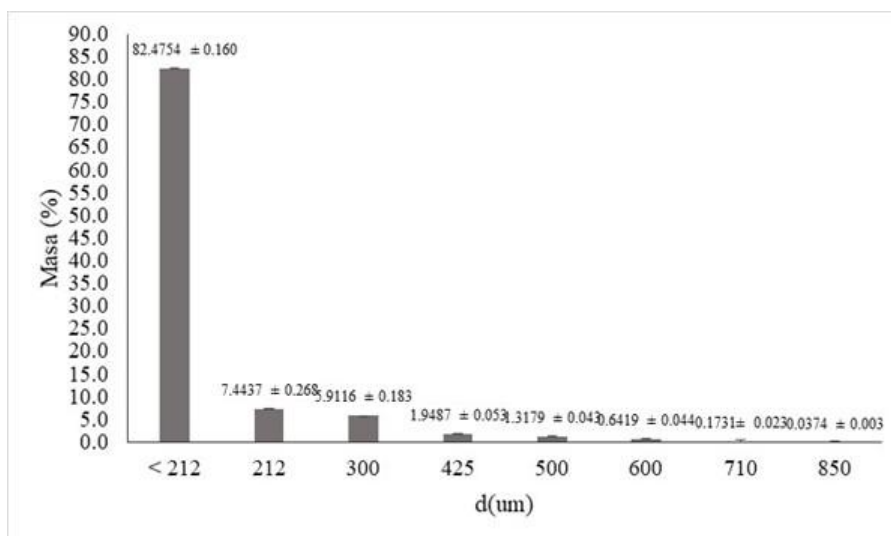
Los resultados nos muestran valores de tamaño menores a 450  $\mu\text{m}$  en porcentajes mayores al 1%. Según ([Rosentrater & Evers, 2017](#)), manifiestan que para cumplir con los requisitos en la elaboración de pastas alimenticias, las harinas deben presentar una granulometría de tamaños entre 150  $\mu\text{m}$  y 450  $\mu\text{m}$ , es decir, entre mallas 35 a 100 respectivamente. La harina de amaranto cocido presenta una granulometría dentro de lo manifestado.

En la Figura 13 se presenta la distribución de masa (%) de la harina cocida de amaranto en función del tamaño de partícula. En ella podemos observar que la mayor cantidad de masa se encuentra a menores de 212  $\mu\text{m}$ , indicándonos con ello que la harina tiene tamaños menores a 212  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 6**

*Cantidad de retención en tamizaje de las harinas de amaranto cocido.*

Malla	Abertura (µm)	masa (g)	Masa (%)
18	1 mm	0	0
20	850	0.0374 ± 0.003	0.04
25	710	0.1731 ± 0.023	0.17
30	600	0.6419 ± 0.044	0.64
35	500	1.3179 ± 0.043	1.32
40	425	1.9487 ± 0.053	1.95
50	300	5.9116 ± 0.183	5.91
70	212	7.4437 ± 0.268	7.45
Colector	Menor de 212	82.4754 ± 0.160	82.52
Total		99.95	



**Figura 14.** *Distribución de masa (%) de la harina cocida de amaranto en función del tamaño de partícula*

Por otro lado, una harina con alta uniformidad de granulometría promueve una mejor calidad sensorial de textura, sabor y apariencia visual al producto final, ya que absorbe el agua de manera homogénea, promueve una cocción uniforme (Rios et al., 2018).

## 4.2 VIDA ÚTIL ESTIMADA

### 4.2.1 Resultado de determinación de humedad de equilibrio

La humedad de equilibrio experimental para diferentes condiciones de humedad relativa para la harina de amaranto cocido fue determinado a la temperatura de 20 °C como es mostrado en la Tabla 7, humedad de equilibrio (g agua/100 g ms) para cada valor de actividad de agua experimental obtenida. El conocimiento de este variable radica por su importancia de comportamiento

**Tabla 7**  
*Resultados experimentales de humedad de equilibrio para harina de amaranto cocido a 23°C*

<b>aw</b>	<b>Humedad (g de agua/ 100 g ms)</b>
0.11	4.44
0.59	13.146
0.95	46.641

El contenido de humedad es otro factor importante que influye en el almacenamiento seguro de la harina y se ve afectado significativamente por las condiciones de almacenamiento. En general, la harina de cereal tiene un contenido de humedad más bajo y se considera microbiológicamente segura, pero la calidad puede degradarse por completo durante el almacenamiento a largo plazo (Liu et al., 2022). Con cambios en las condiciones de manipulación y molienda, se ha informado que la harina contiene en promedio de 6 a 13 %, y se ha observado que el valor aumenta significativamente durante el almacenamiento (V. F. Abioye et al., 2018; Akinola et al., 2017a; Gull et al., 2016a). Se ha demostrado que el contenido de humedad o la humedad y la temperatura de almacenamiento provocan ciertos cambios en la acidez y el pH de los productos (Goyal et al., 2017a).

#### **4.2.2 Determinación de parámetros de los modelos matemáticos**

La relación entre el contenido de humedad en equilibrio ( $X$ ) y la actividad de agua ( $a_w$ ) para la harina de amaranto cocido, fueron simulados para cuatro modelos matemáticos los de mayor uso en alimentos como el GAB, Henderson, Oswin y Caurie. En la Tabla 8 podemos visualizar los resultados de los parámetros de los modelos matemáticos usados en la determinación de las isotermas de estabilidad de la harina cocida de amaranto.

**Tabla 8**

Valores de los parámetros de los modelos matemáticos para la estabilidad de harina cocida de amaranto a 23°C.

Modelo	Modelo matemático	Constante	Valor
GAB	$M = \frac{M_0 * C_g * k_g * a_w}{(1 - k_g * a_w) (1 + k_g * a_w (C_g - 1))}$	Kg	0.9093
		Cg	14.6001
		M <sub>0</sub>	6.4628
		R <sup>2</sup>	0.9687
		RMSE %	3.7145
Oswin	$M = A \left[ \frac{Aw}{(1 - Aw)} \right]^B$	A	11.2055
		B	0.4841
		R <sup>2</sup>	0.9952
		RMSE %	2.7053
		B1	0.0611
Henderson	$(1 - Aw) = \exp(-B2 M^{B1})$	B2	1.0142
		R <sup>2</sup>	0.9455
		RMSE %	8.6364
		A	0.6561
		B	3.3511
Caurie	$M = \exp(A + B * aw)$	R <sup>2</sup>	0.9447
		RMSE %	9.6399

El modelo Oswin presentó el mejor ajuste de los datos experimentales de sorción mostrando un valor mínimo de 2.70 % de RMSE, seguido el modelo GAB de

3.71 %. Esto nos predice que las ecuaciones de sorción GAB y Oswin podrían describir mejor el comportamiento de adsorción de humedad de equilibrio frente a diferentes condiciones de humedad ambiental. Los modelos de Henderson y Caurie presentaron errores de ajuste de 8.64 y 9.64 % de cuadrado medio de error, valores aun dentro del límite de aceptabilidad. El ajuste de la isoterma se realizó por optimización de Solver de Excel. La bondad de ajuste de cada modelo se evaluó en base al error cuadrático medio mínimo (RMSE%). El RMSE (%) proporciona una medida del error general del modelo; un valor de RMSE <10% indica un buen ajuste del modelo en estudio ([Igbabul et al., 2013](#)).

El  $R^2$  de ajuste de regresión cuadrático para el modelo GAB y el ajuste lineal para los modelos Oswin, Henderson y Caurie mostraron valores mayores a 0.90 donde podemos afirmar que los valores experimentales de humedad de equilibrio presentaron confiabilidad en sus resultados.  $R^2$  se puede usar como una medida de qué tan bien se ajustan los datos (en este caso) a una línea recta. Un valor de  $R^2$  inferior a 0,9 corresponde a una imperfección de la línea de datos ([Billo, 2007](#)).

#### **4.2.3 Determinación de humedad de equilibrio simulado**

Con los parámetros obtenidos para los modelos matemáticos de GAB, Oswin, Henderson y Caurie, se realizaron la simulación de la humedad de equilibrio para cada modelo matemático en estudio, esto resultados que se muestran en la Tabla 9. Se obtuvieron valores de humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ ) en el rango de 5.105 a 26.201 g agua/ 100 g de materia seca y actividad de agua ( $a_w$ ) entre 0,07 y 0,97,

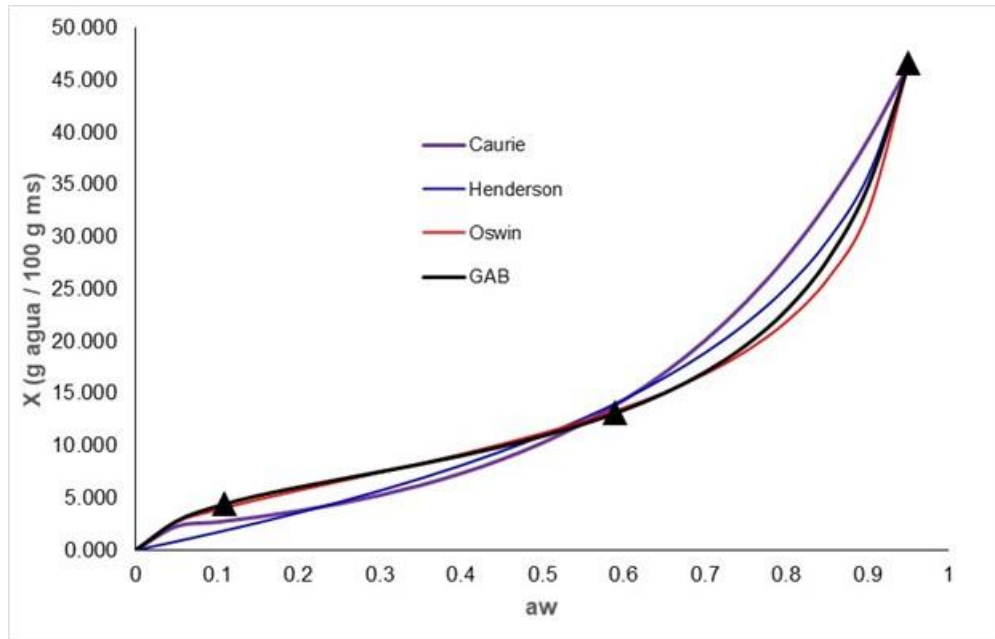
respectivamente. Estos valores se determinaron usando cada modelo matemático como para el modelo GAB, Oswin, Henderson y Courie.

En la Figura 15 se describe la isoterma de adsorción de la harina de amaranto cocido, los modelos de adsorción de humedad que mejor describen los datos de humedad de equilibrio de la harina de amaranto cocido, en orden decreciente de su bondad de ajuste son: GAB, Oswin, Henderson y Courie; por lo que conjuntamente fueron usados en el desarrollo de los modelos matemáticos en la simulación. Los valores simulados tienen mejor ajuste para los modelos de GAB y Oswin, pasando las curvas ajustadas muy cercanos a los valores experimentalmente obtenidos,

**Tabla 9**

*Humedad de equilibrio experimental y simulado para los diferentes modelos matemáticos determinados a 23°C para harina cocida de amaranto.*

<b>aw</b>	<b>X_ Experimental</b>	<b>X_Gab</b>	<b>X_Oswin</b>	<b>X_Henserson</b>	<b>X_Caurie</b>
0.11	4.44	4.400	4.073	1.891	2.786
0.59	13.146	13.146	13.364	14.066	13.919
0.95	46.641	46.6	46.610	46.467	46.5088



**Figura 15.** Isoterma de adsorción de agua en harina de amaranto cocido, experimental y simulado para diferentes modelos matemáticos evaluado a 23°C.

Según el gráfico de la Figura 14, la forma de las curvas para los modelos GAB, Oswin, tiene un comportamiento sigmoide, típico de las isotermas del tipo II (Brunauer et al., 1940). Este tipo de isoterma se puede clasificar en tres regiones: la primera corresponde a la humedad monocapa fuertemente ligada a la matriz del producto (0 a 0.12 aproximadamente); el segundo es casi lineal, correspondiente al agua multicapa (0.12 a 0.70); y la tercera región está relacionada con el agua libre disponible (0.7 a 0.95) para reacciones químicas (Mathlouthi, 2001). La ecuación GAB también se ha utilizado satisfactoriamente para otros productos extruidos y de leguminosas (Wani & Kumar, 2016b).



También se observa entrecruzamiento entre modelos, según (Shafiur, 2003), manifiesta que el entrecruzamiento de las isothermas de adsorción se debe a que en algunos alimentos una parte del soluto (sales y/o azúcar), está ligada a un polímero (almidón y proteína) y la otra parte es cristalina o amorfa, de otra parte se puede deber a la composición de los granos, sobre todo en la superficie referidos a la fibra, grasas (como ceras) y carbohidratos, de hecho la harina de kiwicha presenta un contenido mayor de fibra de 6.7 % y 4,36 % de grasa, otro factor es la desnaturalización de proteínas, que produce un desdoblamiento de la molécula exponiendo un mayor número de sitios polares disponibles para la unión de agua (Viades, 2011), y estos pseudocereales son ricos en contenidos proteicos.

En la Tabla 10, se muestra los parámetros de bondad de ajuste ( $R^2$  y RSM(%)) respectivamente.

**Tabla 10**

*Parámetros de bondad de ajuste de los modelos de sorción humedad de la harina de amaranto cocido.*

<b>Modelo matemático</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>RSM(%)</b>
GAB	0.99	0
Oswin	0.96	0.184
Henderson	0.92	7.371
Caurie	0.90	3.349

El RSM (%) fue inferior al 5% para las condiciones de estudio, lo cual es reportado como satisfactorio, (Diosady et al., 1996; Saravacos et al., 1986) mencionan que valores de RSM (%) entre 2 y 3 % son indicadores de buen ajuste.

El modelo de G.A.B, es recomendada para productos alimenticios en el rango de 0,00 a 0,90 de actividad de agua (Matos, 1992). El modelo de Oswin es recomendada para productos alimenticios con alto contenido de almidón, el componente principal de la harina de kiwicha es la proteína (Liu et al., 2022).

#### **4.2.4 Vida útil estimado**

La vida útil estimado para la harina de amaranto cocido en función a las isotermas de estabilidad de almacenamiento fue determinada para la temperatura ambiental de 23 °C y empacadas en empaque de polietileno de abaja densidad de permeabilidad al vapor de agua de 11.4657 (g agua  $\mu\text{m} \cdot \text{día}^{-1} \text{m}^{-2} \text{mmHg}^{-1}$ ) de 30  $\mu\text{m}$  de espesor. La harina fue almacenado a condiciones ambientales de 23 °C de temperatura y HR de 75 %, los resultados se tienen en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Vida útil de harina de amaranto cocido empacado en DOYPACK de permeabilidad de 11.4657 (g agua  $\mu\text{m. día-1m-2 mmHg-1}$ ) de 30  $\mu\text{m}$  de espesor.*

<b>Modelo matemático</b>	<b>Vida útil (días)</b>
GAB	322
Oswin	960
Henderson	338
Caurie	358

Componente de DOYPACK: PEBD + PET

El tiempo de vida útil de la harina de amaranto cocido fue de 11 meses en promedio aproximadamente, como se muestra en la Tabla 11 para los modelos de GAB, Oswin, Henderson y Caurie. El tiempo para cada modelo difiere de manera significativa, debido a varios factores como que puede ser: características de la harina, del proceso, del empaque y las condiciones de almacenamiento como también del modelo que se ajusta a cada tipo de producto por su composición. La capacidad de almacenamiento y la vida útil de la harina dependen de varios factores como, los factores intrínsecos, el contenido y la composición del agua, y los factores extrínsecos, como la temperatura, el empaque, los gases o los vapores, afectan los cambios físicos, químicos y bioquímicos en la harina almacenada (Li et al., 2017b). En alimentos cocidos y mixtos cuya composición química es conocida, el transporte de humedad y oxígeno a través del envase afecta las características de calidad durante el almacenamiento (Shaviklo et al., 2015). En general, la estabilidad de los alimentos depende de su composición, técnicas de procesamiento y condiciones de almacenamiento (Li et al., 2017b).

La temperatura y el tipo de materiales de empaque utilizados en los contenedores también son factores importantes para controlar el deterioro de la harina. La vida útil de la harina fresca se puede extender mediante el control de dichos parámetros (Li et al., 2017b). Para aprovechar todo el potencial de la harina en el procesamiento de alimentos, ya sea pura o compuesta, es esencial comprender los efectos de la temperatura de almacenamiento y los materiales de envasado en las propiedades fisicoquímicas, microbianas y sensoriales de la harina almacenada. (Iqbal & Fitzpatrick, 2006) afirmaron que la exposición de las harinas a cierta temperatura y humedad relativa puede provocar el apelmazamiento de la harina. La harina puede absorber y retener fácilmente la humedad durante el transporte y el almacenamiento. Los materiales de empaque flexible se diferencian por su permeabilidad al oxígeno y la humedad que tiene cada uno de ellos, por lo que su elección del material de empaque es vital (Forsido et al., 2021).

El contenido de humedad de los alimentos puede afectar significativamente la calidad y la vida útil (Li et al., 2017b). La harina es un producto sensible a la humedad y el almacenamiento a largo plazo con materiales de embalaje permeables puede provocar que la harina absorba la humedad (Sakač et al., 2016). Por otro lado, un mayor contenido de humedad en la harina desfavorece la estabilidad de su vida útil (Eleazu et al., 2012). El aumento del contenido de humedad puede mejorar las actividades de los microorganismos, lo que puede provocar el deterioro de la harina.

#### **4.3 CAMBIO QUÍMICO DE LA HARINA**

### 4.3.1 Variación de índice de peróxido durante el almacenamiento

En la tabla 12 podemos observar los resultados de los cambios químicos ocurridos en la harina de amaranto cocido.

La harina al inicio reporto una actividad de agua de  $0.168 \pm 0.002$ , a partir de este valor se dio el inicio de los cambios de rancidez oxidativa. Con una actividad de agua muy baja ( $<0,2$ ), la tasa de cambios de deterioro, como la oxidación de lípidos, es mayor (Rahman, 2010).

**Tabla 12**

*Variación de índice peróxido (meq O<sub>2</sub>/ kg) en harina de amaranto cocido durante almacenamiento a 20 °C.*

<b>Tiempo (meses)</b>	<b>IP (meq/ kg grasa)</b>
0	$1.94 \pm 0.01$
30	$1.78 \pm 0.2$
60	$2.2 \pm 0.04$
90	$2.48 \pm 0.6$
120	$2.63 \pm 0.3$
150	$2.77 \pm 0.6$
180	$3.33 \pm 0.5$

### 4.3.2 Variación de humedad durante el almacenamiento de harina de amaranto cocido

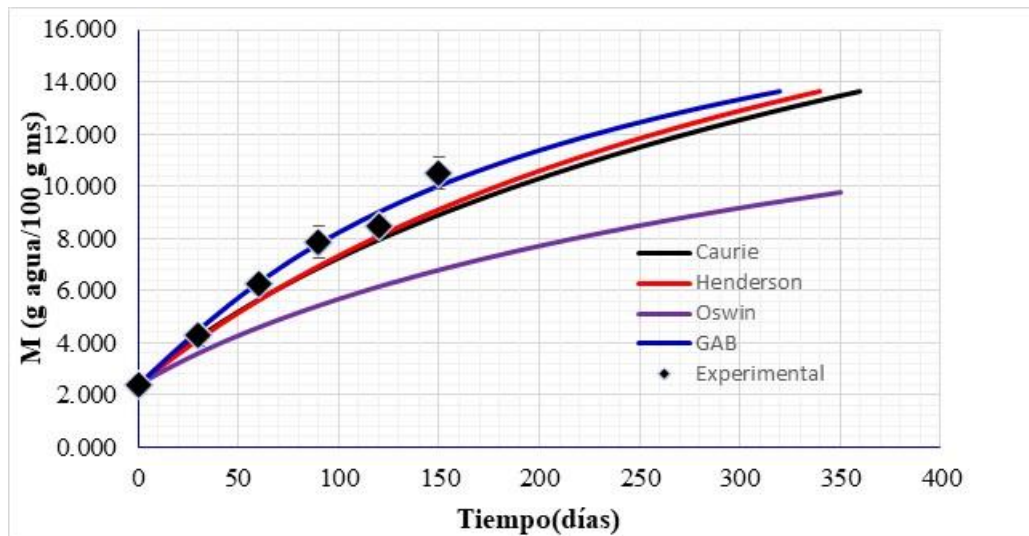
La variación de humedad durante el almacenamiento podemos observar en la Tabla 13 valores experimentales y en la Figura 16 los cambios simulados y experimentales, como se puede apreciar el comportamiento se aproxima a un modelo potencial para los modelos matemáticos en estudio como GAB, Oswin, Henderso y Caurie respectivamente.

**Tabla 13**

*Variación de humedad experimental durante el almacenamiento*

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Humedad (g agua/ 100 g ms) en harina de amaranto cocido a 20 °C</b>
0	2.413 ± 0.11
30	4.262 ± 0.2
60	6.242 ± 0.04
90	7.842 ± 0.6
120	8.481 ± 0.3
150	10.486 ± 0.6

La forma de la gráfica en la Figura 16, es potencial ascendente es consecuencia de la interacción producto, envase y condiciones de almacenamiento. Durante el almacenamiento se producen cambios en las propiedades fisicoquímicas de los materiales alimentarios. El material de empaque es uno de los factores más importantes que afectan las propiedades físicas, químicas y organolépticas de los productos alimenticios deshidratados (Muzaffar & Kumar, 2016).



**Figura 16.** Incremento de humedad en el tiempo de almacenamiento en la harina de amaranto cocido a condiciones ambientales de 20°C

En la investigación se trabajó a temperatura ambiental aproximadamente 20 °C, considerando que los alimentos bajo en humedad se almacenan a esta temperatura como promedio, resultado de ganancia de humedad se observa en la figura 15. Como factor externo la temperatura es un parámetro importante en el almacenamiento de alimento debido a que la estabilidad o durabilidad de un alimento (Guevara Paredes, 2015). La temperatura afecta el movimiento de las moléculas de agua y el balance de energía entre el vapor y las fases adsorbidas.

La absorción de humedad de los productos alimentos durante el almacenamiento depende de las isothermas de absorción de humedad de los alimentos, la permeabilidad al vapor de agua de la película de envasado y la humedad relativa ambiental (Yang et al., 2012).

La cocción del grano fue realizado a temperaturas elevadas como 300°C y luego obtenido la harina, estos productos aparte de tener baja humedad presentaran mejor estabilidad. De estos resultados podemos hacer afirmaciones para alimentos deshidratados a temperatura mayores, mayor es su estabilidad almacenándose a temperaturas inferiores del proceso. (A Wani et al., 2015) encontró un resultado similar para la vida útil de un producto elaborado con una mezcla de fenogreco y avena. El incremento de la humedad en alimentos deshidratados durante el almacenamiento conduce a la plastificación y al ablandamiento de la matriz proteica y del almidón, por lo tanto, altera la resistencia del producto (Martínez-Navarrete et al., 2004).



## V. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos llegamos a las siguientes conclusiones:

1. Las propiedades físicas en estudio de la harina de amaranto cocido fueron: humedad 2.43%, actividad de agua de  $0.168 \pm 0.002$ .
2. Las propiedades funcionales de la harina de amaranto cocido fueron: WAI (g/g) de  $2.681 \pm 0.217$ ; WSI (g/100 g) de  $10.300 \pm 4.078$  y poder de hinchamiento (g/g) de  $0.01 \pm 0.001$ .
3. Los parámetros de los modelos matemáticos en estudio de la isoterma de adsorción de agua determinaron buen ajuste en referencia a los valores experimentales.
4. La isoterma de humedad de equilibrio de estabilidad de la harina de amaranto cocido simulada presentó una buena similitud al experimental.
5. La vida útil estimada para los modelos matemáticos fue de 322 a 358 días.
6. El comportamiento de la variación de rancidez oxidativa del componente graso de la harina de amaranto cocido presento una forma exponencial.

## **RECOMENDACIONES**

1. Realizar estudios a más temperatura y diferentes empaques de almacenamiento, esta harina de amaranto cocido de forma artesanal.
2. Hacer estudios a todo el grupo de harinas artesanales producidos en huamanga.

## VI. REFERENCIAS

- A Wani, S., Solanke, N., & Kumar, P. (2015). Extruded product based on oat and fenugreek and their storage stability. *Current Nutrition & Food Science*, 11(1), 78-84.
- Abdolshahi, A., Heydari Majd, M., Abdollahi, M., Fatemizadeh, S., & Monjazebeh Marvdashti, L. (2020). Edible Film Based on *Lallemantia peltata* L. Seed Gum: Development and Characterization. *Journal of Chemical Health Risks*.
- Abdullah, N., Nawawi, A., & Othman, I. (2000). Fungal spoilage of starch-based foods in relation to its water activity (aw). *Journal of Stored Products Research*, 36(1), 47-54. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(99\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(99)00026-0)
- Abioye, V. F., Ogunlakin, G. O., & Taiwo, G. (2018). Effect of germination on anti-oxidant activity, total phenols, flavonoids and anti-nutritional content of finger millet flour. *J Food Process Technol*, 9(2), 719.
- Abioye, V., Ogunlakin, G., & Taiwo, G. (2018). Effect of Germination on Anti-oxidant Activity, Total Phenols, Flavonoids and Anti-nutritional Content of Finger Millet Flour. *Journal of Food Processing & Technology*, 09. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000719>
- Akinola, S. A., Badejo, A. A., Osundahunsi, O. F., & Edema, M. O. (2017a). Effect of preprocessing techniques on pearl millet flour and changes in technological properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(4), 992-999.

- Akinola, S. A., Badejo, A. A., Osundahunsi, O. F., & Edema, M. O. (2017b). Effect of preprocessing techniques on pearl millet flour and changes in technological properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(4), 992-999. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13363>
- Alegbejo, J. (2014). Nutritional Value and Utilization of Amaranthus (Amaranthus spp.) – A Review. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(1), 136. <https://doi.org/10.4314/bajopas.v6i1.27>
- Alegbejo, J. O. (2013). Nutritional value and utilization of Amaranthus (Amaranthus spp.)—a review. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(1), 136- 143.
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. *Food and bioproducts processing*, 80(2), 118-128.
- ARAÚJO, J. (2004). *Química de Alimentos-Teoria e Prática 3a. Edição*. Viçosa: UFV.
- Aviara, N. A. (2020). Moisture sorption isotherms and isotherm model performance evaluation for food and agricultural products. *Sorption in 2020s*, 143.
- Aviara, N. A., & Ajibola, O. O. (2002). Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 107-113.
- Azuara, E., & Beristain, C. I. (2006). Enthalpic and entropic mechanisms related to water sorption of yogurt. *Drying Technology*, 24(11), 1501-1507.
- Basu, S., Shivhare, U. S., & Mujumdar, A. S. (2006). Models for sorption isotherms for foods: A review. *Drying technology*, 24(8), 917-930.
- Bell, L. N., & Labuza, T. P. (2000). *Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use*.

- Ben Mustapha, M., Bousselmi, M., Jerbi, T., Ben Bettaïeb, N., & Fattouch, S. (2014). Gamma radiation effects on microbiological, physico-chemical and antioxidant properties of Tunisian millet (*Pennisetum Glaucum* L.R.Br.). *Food Chemistry*, 154, 230-237.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.015>
- Bento, J. A. C., Morais, D. K., de Berse, R. S., Bassinello, P. Z., Caliari, M., & Soares Júnior, M. S. (2022). Functional, thermal, and pasting properties of cooked carioca bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *Applied Food Research*, 2(1), 100027. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100027>
- Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems: Theoretical aspects.
- Beuchat, L. R., Komitopoulou, E., Beckers, H., Betts, R. P., Bourdichon, F., Fanning, S., Joosten, H. M., & Ter Kuile, B. H. (2013). Low–water activity foods: Increased concern as vehicles of foodborne pathogens. *Journal of food protection*, 76(1), 150-172.
- Bhandari, B. R., & Adhikari, B. P. (2008). Water activity in food processing and preservation. En *Drying technologies in food processing* (Vol. 1). Blackwell Publishing: Oxford, UK.
- Bianco D, H. W., Capote L, T., & Garmendia G, C. (2014). Determinación de humedad en harina precocida de maíz blanco utilizando un horno de microondas doméstico. *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, 45(2), 50-63.

- Billo, E. J. (2007). *Excel for scientists and engineers: Numerical methods*. John Wiley & Sons.
- Bonilla, E., Azuara, E., Beristain, C. I., & Vernon-Carter, E. J. (2010). Predicting suitable storage conditions for spray-dried microcapsules formed with different biopolymer matrices. *Food Hydrocolloids*, 24(6-7), 633-640.
- Bressani, R., Sánchez-Marroquín, A., & Morales, E. (1992). Chemical composition of grain amaranth cultivars and effects of processing on their nutritional quality. *Food Reviews International*, 8(1), 23-49.
- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical society*, 62(7), 1723-1732.
- Caselato-Sousa, V. M., & Amaya-Farfán, J. (2012). State of knowledge on amaranth grain: A comprehensive review. *Journal of Food Science*, 77(4), R93- R104.
- Chakrabarty, M. M. (2003). *Chemistry and technology of oils & fats (Vol. 1)*. Allied Publishers.
- Chandra, P. K., & Singh, R. P. (2017). *Applied numerical methods for food and agricultural engineers*. CRC Press.
- Chapra, S. C., Canale, R. P., Ruiz, R. S. G., Mercado, V. H. I., Díaz, E. M., & Benites, G. E. (2011). *Métodos numéricos para ingenieros (Vol. 5)*. McGraw-Hill.
- Chirife, J., & Iglesias, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1—A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 13(3), 159-174.

- Damodaran, S., Parkin, K. L., & Fennema, O. R. (2007). *Fennema's food chemistry*. CRC press.
- Díaz, S. H. (2012). El Amaranto: Prodigioso alimento para la longevidad y la vida. *Kalpana*, 8, 50-66.
- Ding, Q.-B., Ainsworth, P., Tucker, G., & Marson, H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *Journal of Food engineering*, 66(3), 283- 289.
- Diosady, L. L., Rizvi, S. S. H., Cai, W., & Jagdeo, D. J. (1996). Moisture Sorption Isotherms of Canola Meals, and Applications to Packaging. *Journal of Food Science*, 61(1), 204-208. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb14760.x>
- D'Souza, A. A., Kumari, D., & Banerjee, R. (2017). 15—Nanocomposite biosensors for point-of-care—Evaluation of food quality and safety. En A. M. Grumezescu (Ed.), *Nanobiosensors* (pp. 629-676). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804301-1.00015-1>
- Dussán-Sarria, S., Hurtado-Hurtado, D. L., & Camacho-Tamayo, J. H. (2019). Granulometría, Propiedades Funcionales y Propiedades de Color de las Harinas de Quinoa y Chontaduro. *Información tecnológica*, 30(5), 3-10. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500003>
- Eihner, K. (1985). The influence of water content and water activity on chemical changes in foods of low moisture content under packaging aspects. In "Food Packaging and Preservation", M. Mathlouthi. Elsevier Applied Science Publishers.

- Eleazu, C. O., Eleazu, K. C., Awa, E., & Chukwuma, S. C. (2012). Comparative study of the phytochemical composition of the leaves of five Nigerian medicinal plants. *Journal of Biotechnology and Pharmaceutical Research*, 3(2), 42- 46.
- Escobedo-Avellaneda, Z., Velazquez, G., Torres, J. A., & Welte-Chanes, J. (2012). Inclusion of the variability of model parameters on shelf-life estimations for low and intermediate moisture vegetables. *LWT*, 47(2), 364-370.
- Farakos, S. S., Frank, J. F., & Schaffner, D. W. (2013). Modeling the influence of temperature, water activity and water mobility on the persistence of Salmonella in low-moisture foods. *International journal of food microbiology*, 166(2), 280-293.
- Fellows, P. J. (2009). 1—Properties of food processing. En P. J. Fellows (Ed.), *Food Processing Technology (Third Edition) (Third Edition, pp. 11-95)*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845696344.1.11>
- Fletcher, S. J. (2017). Chapter 8—Numerical Solutions to Initial Value Problems. Eng. J. Fletcher (Ed.), *Data Assimilation for the Geosciences (pp. 273-315)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804444-5.00008-8>
- Forsido, S. F., Welelaw, E., Belachew, T., & Hensel, O. (2021). Effects of storage temperature and packaging material on physico-chemical, microbial and sensory properties and shelf life of extruded composite baby food flour. *Heliyon*, 7(4), e06821. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06821>
- Gallagher, M. S., Mahajan, P. V., & Yan, Z. (2011). Modelling chemical and physical deterioration of foods and beverages. En *Food and beverage stability and shelf life (pp. 459-481)*. Elsevier.



- García Jiménez, A., & Vázquez, C. L. (2016). Masa y harina de maiz nixtamalizado. *Investigación y desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(2), 78- 82.
- García-Pérez, J. V., Cárcel, J. A., Clemente, G., & Mulet, A. (2008). Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. *LWT-Food Science and Technology*, 41(1), 18-25.
- Gautam, B., Govindan, B. N., Gänzle, M., & Roopesh, M. S. (2020). Influence of water activity on the heat resistance of *Salmonella enterica* in selected low- moisture foods. *International Journal of Food Microbiology*, 334, 108813. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108813>
- Gorinstein, S., Vargas, O. J. M., Jaramillo, N. O., Salas, I. A., Ayala, A. L. M., Arancibia-Avila, P., Toledo, F., Katrich, E., & Trakhtenberg, S. (2007). The total polyphenols and the antioxidant potentials of some selected cereals and pseudocereals. *European Food Research and Technology*, 225(3), 321-328.
- Goyal, P., Chugh, L. K., & Berwal, M. K. (2017a). Storage effects on flour quality of commonly consumed cereals. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(1), 551-555.
- Goyal, P., Chugh, L. K., & Berwal, M. K. (2017b). Storage effects on flour quality of commonly consumed cereals. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(1), 551-555. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i1.1228>
- Guadarrama-Lezama, A. Y., Cruz-Olivares, J., Martínez-Vargas, S. L., Carrillo- Navas, H., Román-Guerrero, A., & Pérez-Alonso, C. (2014). Determination of the minimum integral entropy, water sorption and glass

- transition temperature to establishing critical storage conditions of beetroot juice microcapsules by spray drying. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13(2), 405-416.
- Guevara Paredes, C. J. (2015). Efecto de la temperatura en isotermas de adsorción de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) en hojuelas.
- Guillen-Portal, F. R., Baltensperger, D. D., & Nelson, L. A. (1999). Plant population influence on yield and agronomic traits in Plainsman grain amaranth. *Perspectives on new crops and new uses*. ASHS Press, Alexandria, VA, 190-193.
- Gull, A., Prasad, K., & Kumar, P. (2016a). Evaluation of functional, antinutritional, pasting and microstructural properties of Millet flours. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(1), 96-102.
- Gull, A., Prasad, K., & Kumar, P. (2016b). Evaluation of functional, antinutritional, pasting and microstructural properties of Millet flours. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(1), 96-102.  
<https://doi.org/10.1007/s11694-015-9281-0>
- Gupta, S., Chhabra, G. S., Liu, C., Bakshi, J. S., & Sathe, S. K. (2018). Functional Properties of Select Dry Bean Seeds and Flours: Dry bean flour functionality.... *Journal of Food Science*, 83(8), 2052-2061. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14213>
- Gutkoski, L. C., & El-Dash, A. A. (1998). Effects of moisture and extrusion temperatures on the oxidative stability of milling oat products with granularity below 532

µm. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 41(4), 401-408.

<https://doi.org/10.1590/S1516-89131998000400003>

Harcar, T., & Karakaya, F. (2005). A cross-cultural exploration of attitudes toward product expiration dates. *Psychology & Marketing*, 22(4), 353-371.

Heiss, R. (1958). Shelf-life determinations. *Modern Packaging*, 31(8), 119.

Henderson, S. M. (1952a). A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural engineering*, 33, 29-32.

Henderson, S. M. (1952b). A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural engineering*, 33, 29-32.

Igbabul, B. D., Ariahu, C. C., & Umeh, E. U. (2013). Moisture adsorption isotherms of African Arrowroot Lily (*Tacca involucrata*) Tuber Mash as influenced by blanching and natural fermentation. *Journal of Food Research*, 2(3), 79.

Iqbal, T., & Fitzpatrick, J. J. (2006). Effect of storage conditions on the wall friction characteristics of three food powders. *Journal of Food Engineering*, 72(3), 273-280. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.007>

Kamau, E., Mutungi, C., Kinyuru, J., Imathiu, S., Tanga, C., Affognon, H., Ekesi, S., Nakimbugwe, D., & Fiaboe, K. K. M. (2018). Moisture adsorption properties and shelf-life estimation of dried and pulverised edible house cricket *Acheta domesticus* (L.) and black soldier fly larvae *Hermetia illucens* (L.). *Food Research International*, 106, 420-427.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.012>

Karel, M., & Labuza, T. P. (1969). Optimization of protective packaging of space foods. US Air Force Contract F-43-609-68-C0015. Aerospace Medical School, Texas.

- Kulchan, R., Boonsupthip, W., & Suppakul, P. (2010). Shelf life prediction of packaged cassava-flour-based baked product by using empirical models and activation energy for water vapor permeability of polyolefin films. *Journal of Food Engineering*, 100(3), 461-467.
- Kumar, P., & Mishra, H. N. (2006). Moisture sorption characteristics of mango–soy-fortified yogurt powder. *International journal of dairy technology*, 59(1), 22-28.
- Labuza, T. P. (1968). Sorption phenomena in foods. *Food Technol.*, 22, 15-19. Labuza, T. P. (1982). *Shelf-life dating of foods*. Food & Nutrition Press, Inc.
- Labuza, T. P., Heidelbaugh, N. D., Silver, M., & Karel, M. (1971). Oxidation at intermediate moisture contents. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 48(2), 86-90.
- Lee, D. S., & Robertson, G. L. (2021). Interactive influence of decision criteria, packaging film, storage temperature and humidity on shelf life of packaged dried vegetables. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100674>
- Lee, D. S., Yam, K. L., & Piergiovanni, L. (2008). *Food packaging science and technology*. CRC press.
- Li, M., Ma, M., Zhu, K.-X., Guo, X.-N., & Zhou, H.-M. (2017a). Critical conditions accelerating the deterioration of fresh noodles: A study on temperature, pH,

water content, and water activity. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4), e13173.

Li, M., Ma, M., Zhu, K.-X., Guo, X.-N., & Zhou, H.-M. (2017b). Critical conditions accelerating the deterioration of fresh noodles: A study on temperature, pH, water content, and water activity. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4), e13173.

Lin, T., & Fernández-Fraguas, C. (2020). Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *LWT*, 127, 109325. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109325>

Liu, S. X., Chen, D., & Xu, J. (2022). Physiochemical properties of jet-cooked amaranth and improved rheological properties by processed oat bran. *Future Foods*, 5, 100107. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100107>

Lomauro, C. J., Bakshi, A. S., & Labuza, T. P. (1985). Evaluation of food moisture sorption isotherm equations part II: Milk, coffee, tea, nuts, oilseeds, spices and starchy foods. *LWT-Food Science and Technology*, 18(2), 118-124.

Ma, Y., Xu, D., Sang, S., Jin, Y., Xu, X., & Cui, B. (2021). Effect of superheated steam treatment on the structural and digestible properties of wheat flour. *Food Hydrocolloids*, 112, 106362. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106362>

- Macedo, I. S. M., Sousa-Gallagher, M. J., Oliveira, J. C., & Byrne, E. P. (2013). Quality by design for packaging of granola breakfast product. *Food control*, 29(2), 438-443.
- Maltini, E., Torreggiani, D., Venir, E., & Bertolo, G. (2003). Water activity and the preservation of plant foods. *Food Chemistry*, 82(1), 79-86.  
[https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00581-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00581-2)
- Martínez-Navarrete, N., Moraga, G., Talens, P., & Chiralt, A. (2004). Water sorption and the plasticization effect in wafers. *International journal of food science & technology*, 39(5), 555-562.
- Martirosyan, D. M., Miroshnichenko, L. A., Kulakova, S. N., Pogojeva, A. V., & Zoloedov, V. I. (2007). Amaranth oil application for coronary heart disease and hypertension. *Lipids in health and disease*, 6(1), 1-12.
- Mathlouthi, M. (2001). Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food control*, 12(7), 409-417.
- Matos, C., R. A. (1992). Evaluación de modelos matemáticos de isotermas de sorción en oca (*Oxalis tuberosa* Mol.), olluco (*Ullucus tuberosus* Loz.) algunos derivados. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima (Peru). Escuela de Post-Grado
- Mazza, G., & LeMaguer, M. (1978). Water sorption properties of yellow globe onion (*Allium cepa* L.). *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 11(4), 189-193.

- Muzaffar, K., & Kumar, P. (2016). Moisture sorption isotherms and storage study of spray dried tamarind pulp powder. *Powder Technology*, 291, 322-327.
- Nasir, M., Akhtar, S., & Sharif, M. K. (2004). Effect of moisture and packaging on the Shelf life of wheat flour. *Internet Journal of Food Safety* V, 4, 1-6.
- Njintang, Y. N., & Mbofung, C. M. F. (2006). Effect of precooking time and drying temperature on the physico-chemical characteristics and in-vitro carbohydrate digestibility of taro flour. *LWT-Food Science and Technology*, 39(6), 684-691
- Oswin, C. R. (1946a). The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 65(12), 419-421.
- Oswin, C. R. (1946b). The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 65(12), 419-421.
- Paško, P., Bartoń, H., Zagrodzki, P., Gorinstein, S., Fołta, M., & Zachwieja, Z. (2009). Anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth. *Food chemistry*, 115(3), 994-998.
- Pereira Da Silva, W., Silva, C. M. D. P. S. E., Silva, D. D. P. S. E., Silva, C. D. P. S. E., & Lima, A. G. B. (2006). Determinação de funções aproximadas para a solução numérica de uma equação diferencial ordinária. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 21(2), 29-37.

- Piergiovanni, L., & Limbo, S. (2019). Chapter 4—Food shelf-life models. En R. Accorsi & R. Manzini (Eds.), *Sustainable Food Supply Chains* (pp. 49- 60). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813411-5.00004-1>
- Pisaříková, B., Kráčmar, S., & Herzig, I. (2005). Amino acid contents and biological value of protein in various amaranth species. *Czech Journal of Animal Science*, 50(4), 169-174.
- Pomeranz, Y. (2013). *Food analysis: Theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Rahman, M. S. (2010). Food stability determination by macro–micro region concept in the state diagram and by defining a critical temperature. *Journal of Food Engineering*, 99(4), 402-416.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.07.011>
- Ramírez-Jiménez, A. K., Reynoso-Camacho, R., Mendoza-Díaz, S., & Loarca-Piña, G. (2014). Functional and technological potential of dehydrated *Phaseolus vulgaris* L. flours. *Food Chemistry*, 161, 254-260.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.008>
- Rao, M. A., Rizvi, S. S. H., & Datta, A. K. (Eds.). (2014). *Engineering Properties of Foods* (0 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420028805>
- Rascón, M. P., Beristain, C. I., García, H. S., & Salgado, M. A. (2011). Carotenoid retention and storage stability of spray-dried encapsulated paprika oleoresin



using gum Arabic and soy protein isolate as wall materials. *LWT- Food Science and Technology*, 44(2), 549-557.

Ravikumar, V., & Narayanan, A. (2017). Storage stability of biofortified pearl millet flour. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 5, 709-713.

Repo-Carrasco, R., Espinoza, C., & Jacobsen, S.-E. (2003). Nutritional value and use of the Andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food reviews international*, 19(1-2), 179- 189.

Rios, M. J. B. L., Damasceno-Silva, K. J., Moreira-Araújo, R. S. D. R., Figueiredo, E. A. T. D., Rocha, M. D. M., & Hashimoto, J. M. (2018). CHEMICAL, GRANULOMETRIC AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WHOLE FLOURS FROM COMMERCIAL CULTIVARS OF COWPEA. *Revista Caatinga*, 31(1), 217-224.

<https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n125rc>

Rizvi, S. (2005). S, H., Thermodynamics properties of foods in dehydration. M, A, Rao, and S, S., H. Rizvi (Eds.), *Engineering properties of foods*, 223-309.

Robertson, G. L. (2012). Food packaging and shelf life. *Food packaging and shelf life, a practical guide*, 1-16.

Robertson, G. L., & Lee, D. S. (2021). Comparison of linear and GAB isotherms for estimating the shelf life of low moisture foods packaged in plastic films.

Journal of Food Engineering, 291,110317.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110317>

Rodas, B., & Bressani, R. (2009). Contenido de aceite, ácidos grasos y escualeno en variedades crudas y procesadas de grano de amaranto. Archivos latinoamericanos de nutricion, 59(1), 82-87.

Rodríguez-Sandoval, E., Lascano, A., & Sandoval, G. (2012). INFLUENCIA DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE LA HARINA DE TRIGO POR HARINA DE QUINOA Y PAPA EN LAS PROPIEDADES TERMOMECÁNICAS Y DE PANIFICACIÓN DE MASAS. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 15(1), 199-207.

Rosentrater, K. A., & Evers, A. D. (2017). Kent's technology of cereals: An introduction for students of food science and agriculture. Woodhead Publishing.

Ruiz-López, I. I., & Herman-Lara, E. (2009). Statistical indices for the selection of food sorption isotherm models. Drying Technology, 27(6), 726-738.

Sakač, M., Pestorić, M., Mandić, A., Mišan, A., Nedeljković, N., Jambrec, D., Jovanov, P., Lazić, V., Pezo, L., & Sedej, I. (2016). Shelf-life prediction of gluten-free rice-buckwheat cookies. Journal of Cereal Science, 69, 336- 343.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.04.008>

Samaniego-Esguerra, C. M., & Robertson, G. L. (1991). Development of a mathematical model for the effect of temperature and relative humidity on the water vapour permeability of plastic films. Packaging Technology and Science, 4(2), 61-68.

- Sanz-Penella, J. M., Wronkowska, M., Soral-Smietana, M., & Haros, M. (2013a). Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. *LWT-Food science and technology*, 50(2), 679-685.
- Sanz-Penella, J. M., Wronkowska, M., Soral-Smietana, M., & Haros, M. (2013b). Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. *LWT - Food Science and Technology*, 50(2), 679-685.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.031>
- Saravacos, G. D., Tsiourvas, D. A., & Tsami, E. (1986). Effect of Temperature on the Water Adsorption Isotherms of Sultana Raisins. *Journal of Food Science*, 51(2), 381-383. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1986.tb11135.x>
- Segurondo Loza, R., & Cortez Quisbert, V. (2020). Determinación de la rancidez en aceites usados en el proceso de frituras en establecimientos de expendio de comida rápida. *Revista CON-CIENCIA*, 8(2), 115-128.
- Shafiur, M. (2003). *Manual de conservación de los alimentos*. Editorial ACRIBIA–España, 1.
- Shafiur, M., & Rahman, M. (2003). *Manual de conservación de los alimentos*. Editorial ACRIBIA–España, 1.
- Shaviklo, A. R., Azaribeh, M., Moradi, Y., & Zangeneh, P. (2015). Formula optimization and storage stability of extruded puffed corn-shrimp snacks. *LWT - Food Science and Technology*, 63(1), 307-314.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.093>

- Singh, R. P., & Anderson, B. A. (2004). The major types of food spoilage: An overview. *Understanding and Measuring the Shelf-life of Food*, 3-23.
- Sirpatrawan, U. (2009). Shelf-life simulation of packaged rice crackers. *Journal of food quality*, 32(2), 224-239.
- Spada, A., Conte, A., & Nobile, M. A. D. (2018). The influence of shelf life on food waste: A model-based approach by empirical market evidence. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3410-3414.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.071>
- Sun, X., Li, W., Hu, Y., Zhou, X., Ji, M., Yu, D., Fujita, K., Tatsumi, E., & Luan, G. (2018). Comparison of pregelatinization methods on physicochemical, functional and structural properties of tartary buckwheat flour and noodle quality. *Journal of Cereal Science*, 80, 63-71.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.016>
- Syamaladevi, R. M., Tadapaneni, R. K., Xu, J., Villa-Rojas, R., Tang, J., Carter, B., Sablani, S., & Marks, B. (2016). Water activity change at elevated temperatures and thermal resistance of Salmonella in all purpose wheat flour and peanut butter. *Food Research International*, 81, 163-170.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.008>
- Syamaladevi, R. M., Tang, J., Villa-Rojas, R., Sablani, S., Carter, B., & Campbell, G. (2016). Influence of water activity on thermal resistance of microorganisms in low-moisture foods: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(2), 353-370.

- Tadapaneni, R. K., Syamaladevi, R. M., Villa-Rojas, R., & Tang, J. (2017). Design of a novel test cell to study the influence of water activity on the thermal resistance of Salmonella in low-moisture foods. *Journal of Food Engineering*, 208, 48-56.
- Tadapaneni, R. K., Xu, J., Yang, R., & Tang, J. (2018). Improving design of thermal water activity cell to study thermal resistance of Salmonella in low- moisture foods. *LWT*, 92, 371-379.
- Tadapaneni, R. K., Yang, R., Carter, B., & Tang, J. (2017). A new method to determine the water activity and the net isosteric heats of sorption for low moisture foods at elevated temperatures. *Food Research International*, 102, 203- 212.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.070>
- Takeungwongtrakul, S., Benjakul, S., Pisuchpen, S., Kaewthong, P., & Nalinanon, S. (2020). Shelf-life Prediction of Micro-encapsulated Shrimp Oil in Different Packages using Empirical Models. *CURRENT APPLIED SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 20(1), 30-42.
- Tonon, R. V., Baroni, A. F., Brabet, C., Gibert, O., Pallet, D., & Hubinger, M. D. (2009). Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice. *Journal of Food Engineering*, 94(3-4), 215- 221.
- USDA, G. M., Rabbit, W., & Cooked, S. (2019). FoodData central. Agric. Res. Serv. Valencia, G. A., Moraes, I. C. F., Lourenço, R. V., Bittante, A. M. Q. B., & Sobral, P. J. do A. (2015). Physicochemical, morphological, and functional

- properties of flour and starch from peach palm (*Bactris gasipaes* K.) fruit. *Starch - Stärke*, 67(1-2), 163-173. <https://doi.org/10.1002/star.201400097>
- Van den Berg, C. (1985). Development of BET-like models for sorption of water on foods, theory and relevance. En *Properties of water in foods* (pp. 119-131). Springer.
- Viades, J. (2011). Adsorción de agua en alimentos. Isoterma de adsorción de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB). *Revista de la UNAM*, 1.
- Viganó, J., Azuara, E., Telis, V. R., Beristain, C. I., Jiménez, M., & Telis-Romero, J. (2012). Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods. *Thermochimica Acta*, 528, 63-71.
- Viveros-Contreras, R., Tellez-Medina, D. I., Perea-Flores, M. J., Alamilla-Beltran, L., Cornejo-Mazon, M., Beristain-Guevara, C. I., Azuara-Nieto, E., & Gutierrez-Lopez, G. F. (2013). Encapsulación de ácido ascórbico en matrices de alginato de calcio por coacervación y liofilización. *Revista mexicana de ingeniería química*, 12(1), 29-39.
- Wani, S. A., & Kumar, P. (2016a). Moisture sorption isotherms and evaluation of quality changes in extruded snacks during storage. *LWT*, 74, 448-455.
- Wani, S. A., & Kumar, P. (2016b). Moisture sorption isotherms and evaluation of quality changes in extruded snacks during storage. *LWT*, 74, 448-455. Wolf, W., Spiess, W. E. L., & Jung, G. (1985). Standardization of isotherm

measurements (COST-project 90 and 90 bis). En Properties of water in foods (pp. 661-679). Springer.

Yang, Z., Zhu, E., & Zhu, Z. (2012). Moisture sorption isotherms and net isosteric heats of sorption of green soybean. *International Journal of Food Engineering*, 8(3).

# **ANEXOS**



## ANEXO 1: Equipos e instrumentos usados



**Equipo medidor de actividad de agua**



**Equipo centrifuga usada**

**ANEXO 2: Muestra usada**



Muestras en almacenamiento



### ANEXO 3: Análisis en laboratorio









## ANEXO 4: Procedimiento de Optimización de constantes de los modelos matemáticos por Solver de Excel

	A	B	C	D	E	F	G	
1								
2		<b>calculo de constantes de GAB por Solver</b>						
3		x	y					
4		<b>aw</b>	<b>M exp (g agua/100 g ms)</b>		K=	0.9083428		
5		0.11	4.44		C=	14.6001		
6		0.59	13.146		Xm=	6.4628084		
7		0.95	46.641					
8								
9								
10	solucion							
11		<b>aw</b>	<b>M</b>	<b>X GAB</b>	<b>(M-X)^2</b>			
12		0.11	4.44	4.44048	0.000000			
13		0.59	13.146	13.14641	0.000000			
14		0.95	46.641	46.64076	0.000000			
15				SUMA=	0.000000			
16					Celda objetivo			
17					se reduzca a minimo			
18					la diferencia			

- 1° hacemos el cuadro (B11 y B12)
- 2° Asignamos un valor 1 1 1 a K C Xm
- 3° Calculamos con la formula X GAB
- 4° Calculamos la columna E y hacemos la suma
- 5° Vamos a solver
- 6° Se obtienen las constantes K, C y Xm
- 7° con los parametros determinados determinamos los nuevos valores de X desde aw o hasta 0.95
- 8° Graficamos los valores

Parámetros de Solver

Establecer objetivo:  ↑

Para:  Máx  Min  Valor de:

Cambiando las celdas de variables:  ↑

Sujeto a las restricciones:

Agregar

Cambiar

Eliminar

Restablecer todo

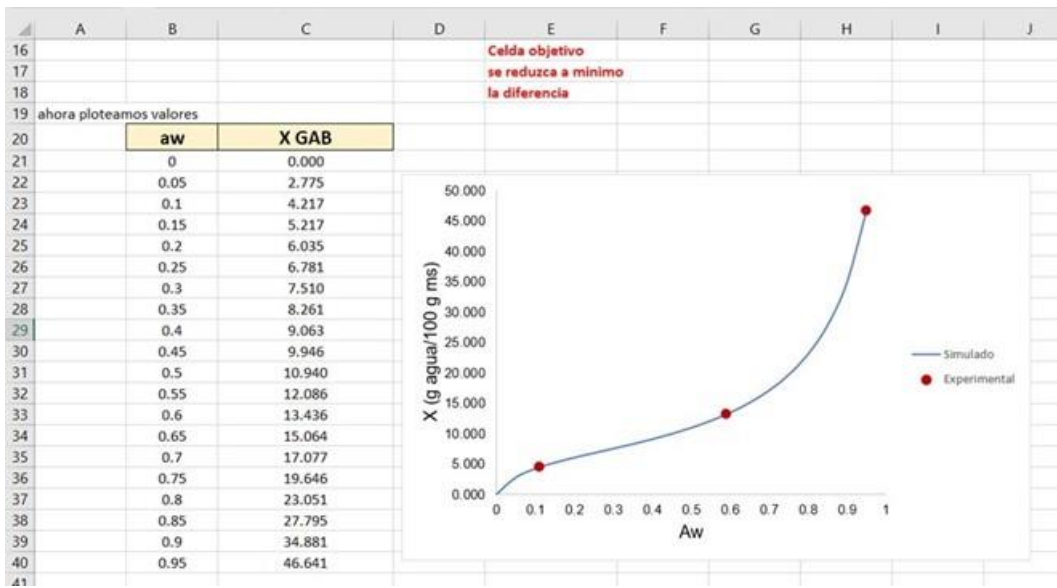
Cargar/Guardar

Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:  Opciones

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.







## INTEGRACION SIMPSON 3/8 COMPUESTO

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{3h}{8} \left( f(a) + 3 \sum_{i=1,3,5,\dots}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{i=2,4,6,\dots}^{n-2} f(x_i) + f(b) \right)$$

$$h = \frac{b-a}{n}$$




$$\int_a^b f(x)dx = \frac{3h}{8} [f(x_0) + 3f(x_1) + 3f(x_2) + 2f(x_3) + 3f(x_4) + 3f(x_5) + 2f(x_6) + 3f(x_7) + 3f(x_8) + \dots + f(x_n)]$$

n= 48  
h= 0.2341

i	x (humedad)	f(x)	Factor	f(x)*factor	Integral=	33.207
0	2.401	1.40940962	1	1.409		
1	2.635	1.42106598	3	4.263	vida util(días)=	321.71
2	2.869	1.43387931	3	4.302		
3	3.104	1.44799333	2	2.896		
4	3.338	1.46356893	3	4.391		
5	3.572	1.48078491	3	4.442		
6	3.806	1.49983805	2	3.000		
7	4.040	1.52094236	3	4.563		
8	4.274	1.54432715	3	4.633		
9	4.508	1.57023379	2	3.140		

## ACTA DE CONFORMIDAD

Los que suscribimos miembros del jurado designado para el acto público de sustentación de la tesis titulada **“PREDICCIÓN DE VIDA ÚTIL DE HARINA DE KIWICHA (AMARANTHUS CAUDATUS) A PARTIR DE ISOTERMA ADSORCIÓN DE AGUA PARA DIFERENTES MODELOS MATEMÁTICOS”** presentado por la Bachiller Yuliana Juana Yupanqui Calle, la cual fue sustentada el día 11 de enero del 2023, en mérito a la Resolución Decanal N°003-2023-UNSCH-FIQM/D de fecha 09 de enero del 2023; damos conformidad al trabajo final corregido, aceptando la publicación final de la mencionada tesis y declaramos el documento APTO para que pueda iniciar sus gestiones administrativas, que conduzcan a la expedición y entrega del título profesional de Ingeniera en Industrias Alimentarias.

<b>MIEMBROS DEL JURADO</b>	<b>DNI</b>	<b>FIRMA</b>
Dr. Saúl Ricardo CHUQUI DIESTRA	<u>32904170</u>	
Mg. Wuelde Cesar DIAZ MALDONADO	<u>28227229</u>	
Mg. Julio Pablo GODENZI VARGAS	<u>31653862</u>	

Ayacucho, enero del 2023



## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El Director de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, hace CONSTAR:

Que, la Srta. Yuliana Juana YUPANQUI CALLE, egresada de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias ha remitido, con el aval y por intermedio de su asesor el Ing. Alberto Luis Huamaní Huamaní, la Tesis: *“Predicción de vida útil de harina de kiwicha (Amaranthus caudatus) a partir de isoterma de adsorción de agua para diferentes modelos matemáticos”*; y se precisa con el Informe de Originalidad de Turnitin, que el índice de similitud del trabajo es de 25% y que se ha generado el Recibo digital que confirma el Depósito que el trabajo ha sido recibido por Turnitin con fecha febrero 25 de 2023 e Identificador de la Entrega N° 2023009704.

Se expide la presente, para los fines pertinentes.

Ayacucho, febrero 27 de 2023.



Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga  
Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia  
E.P. Ingeniería Industrias Alimentarias

*Dr. Alberto Luis HUAMANI HUAMANI*  
DIRECTOR

c.c. : Archivo digital.  
Constancia N° 059



## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Yuliana Juana Yupanqui Calle  
Título del ejercicio: TESIS 2023  
Título de la entrega: "Predicción de vida útil de harina de kiwicha (*Amaranthus c...*)  
Nombre del archivo: TESIS\_FINAL\_2023\_YULIANA\_r.pdf  
Tamaño del archivo: 2.35M  
Total páginas: 117  
Total de palabras: 17,826  
Total de caracteres: 93,275  
Fecha de entrega: 25-feb.-2023 10:07p. m. (UTC-0500)  
Identificador de la entrega... 2023009704

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN  
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



TESIS:

"Predicción de vida útil de harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) a partir de isoterma de adsorción de agua para diferentes modelos matemáticos"

PRESENTADO POR:

**Yuliana Juana, YUPANQUI CALLE**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

ASESOR:

**Dr. Alberto Luis, HUAMANI HUAMANI**

AYACUCHO - PERÚ

2023

# “Predicción de vida útil de harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) a partir de isoterma de adsorción de agua para diferentes modelos matemáticos”

*por* Yuliana Juana Yupanqui Calle

---

**Fecha de entrega:** 25-feb-2023 10:07p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2023009704

**Nombre del archivo:** TESIS\_FINAL\_2023\_YULIANA\_r.pdf (2.35M)

**Total de palabras:** 17826

**Total de caracteres:** 93275

# “Predicción de vida útil de harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) a partir de isoterma de adsorción de agua para diferentes modelos matemáticos”

## INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

25%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://scielo.conicyt.cl">scielo.conicyt.cl</a> Fuente de Internet	5%
2	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="http://dspace.unitru.edu.pe">dspace.unitru.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="http://repositorio.unas.edu.pe">repositorio.unas.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="http://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="http://www.scielo.org.mx">www.scielo.org.mx</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="http://docplayer.es">docplayer.es</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="http://cybertesis.unmsm.edu.pe">cybertesis.unmsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%

9	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Fuente de Internet	1 %
10	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD Trabajo del estudiante	1 %
11	<a href="http://www.scielo.org.co">www.scielo.org.co</a> Fuente de Internet	1 %
12	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	1 %
13	<a href="http://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a> Fuente de Internet	1 %
14	<a href="http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx">repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx</a> Fuente de Internet	1 %
15	<a href="http://qdoc.tips">qdoc.tips</a> Fuente de Internet	1 %
16	<a href="http://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://tesis.unap.edu.pe">tesis.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://www.scielo.org.bo">www.scielo.org.bo</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://repositorio.unajma.edu.pe">repositorio.unajma.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://repositorio.unsch.edu.pe">repositorio.unsch.edu.pe</a>	



Fuente de Internet

<1 %

21

[ingenieria.ute.edu.ec](http://ingenieria.ute.edu.ec)

Fuente de Internet

<1 %

22

Submitted to Universidad Nacional de San  
Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

<1 %

23

Lida Zhang, Patrick M. Grace, Da-Wen Sun. "A  
new theoretical model for moisture sorption  
isotherms and its application in deriving a  
hygroscopicity index for food products",  
Journal of Food Engineering, 2021

Publicación

<1 %

24

[cdigital.uv.mx](http://cdigital.uv.mx)

Fuente de Internet

<1 %

25

[www.slideshare.net](http://www.slideshare.net)

Fuente de Internet

<1 %

26

[www.fcb.uanl.mx](http://www.fcb.uanl.mx)

Fuente de Internet

<1 %

27

[blog.minitab.com](http://blog.minitab.com)

Fuente de Internet

<1 %

28

[pt.scribd.com](http://pt.scribd.com)

Fuente de Internet

<1 %

29

[www.eluniversaledomex.mx](http://www.eluniversaledomex.mx)

Fuente de Internet

<1 %

30	<a href="http://dokumen.pub">dokumen.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
31	Submitted to Universidad Alas Peruanas Trabajo del estudiante	<1 %
32	<a href="http://livrosdeamor.com.br">livrosdeamor.com.br</a> Fuente de Internet	<1 %
33	<a href="http://tecdigital.tec.ac.cr">tecdigital.tec.ac.cr</a> Fuente de Internet	<1 %
34	<a href="http://repositorio.utc.edu.ec">repositorio.utc.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
35	<a href="http://investigacion.bogota.unal.edu.co">investigacion.bogota.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
36	<a href="http://repositorio.unal.edu.co">repositorio.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
37	Submitted to upec Trabajo del estudiante	<1 %
38	<a href="http://repositorio.uncp.edu.pe">repositorio.uncp.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
39	<a href="http://repositorio.upct.es">repositorio.upct.es</a> Fuente de Internet	<1 %
40	<a href="http://www.scielo.org.pe">www.scielo.org.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
41	<a href="http://www.scribd.com">www.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %

42

Gordon L. Robertson, Dong Sun Lee.

"Comparison of linear and GAB isotherms for estimating the shelf life of low moisture foods packaged in plastic films", Journal of Food Engineering, 2020

Publicación

<1 %

43

catarina.udlap.mx

Fuente de Internet

<1 %

44

uvadoc.uva.es

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo