

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE  
DE DIOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE  
INGENIERIA AGROINDUSTRIAL**



**“EVALUACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN  
DE LA HARINA DE TORTA DE CASTAÑA  
(*Bertholletia excelsa*, H.B.K.)”**

Tesis, presentado por:

Bachiller: AROCUTIPA COAQUIRA, David

Bachiller: DELGADO SOLIS, Christopher

Para optar el título profesional de  
Ingeniero Agroindustrial

Asesor: Dr. QUISPE HERRERA, Rosel

Co-asesor: M.Sc. PULLA HUILLCA, Palmer  
Vicente

Puerto Maldonado, 2021

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE  
DE DIOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**



**“EVALUACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN  
DE LA HARINA DE TORTA DE CASTAÑA  
(*Bertholletia Excelsa*, H.B.K.)”**

Tesis, presentado por:

Bachiller: AROCUTIPA COAQUIRA, David

Bachiller: DELGADO SOLIS, Christopher

Para optar el título profesional de  
Ingeniero Agroindustrial

Asesor: Dr. QUISPE HERRERA, Rosel

Co-asesor: M.Sc. PULLA HUILLCA, Palmer  
Vicente

Puerto Maldonado, 2021

## **DEDICATORIA**

A mis Padres, Rosa e Inocencio L.

A mis Hermanas y Hermanos

A mis amigos y amigas

**DAVID**

A mis Padres, DANIEL Y LORENZA

A mis Hermanos

A mis amigos y amigas

**CHRISTOPHER**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecimiento infinito al M.Sc. Palmer Vicente Pulla Huillca, por su asesoramiento en el desarrollo del presente trabajo de tesis. A la ing. Flor Karina Huamán Quispe, por haber encaminado el trabajo de investigación. Al Ing. Julián Colquehuanca Vilca, por el acceso al laboratorio de procesos agroindustriales 1 y 2 para el desarrollo de tesis.

Al rector Dr. Hernando Hugo Dueñas Linares, por haber permitido el acceso a la universidad y por ende la culminación de la tesis. A la Qco. M.sc. Liset Rodríguez Achata, por haber permitido el ingreso al laboratorio de química para la culminación de tesis. Al Ing. M.Sc. Dante Félix Toro Chávez, por el acceso a las instalaciones de la universidad para la culminación de tesis. A la Ing. Yakeli Damiana Choquegonza Sonco, por haber permitido el acceso al laboratorio de química. Al Ing. Felipe Bautista Ferro, Al Ing. José Norvil Rojas Coronel, por haber permitido su apoyo en cuanto a la motivación del desarrollo de la tesis. Al colega Elías Quirita, por sus opiniones y motivación en cuanto a la tesis.

A la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, por haberme permitido formarme con valores éticos y morales. A los profesores de la Carrera IAG, por contribuir mi formación profesional.

A la Sra. Rocío gerente de la empresa INALA, por su apoyo en mi formación profesional. A mis amigos julio Tueros, Christopher, Nilda, Yelsón, que me acompañaron e incentivaron a la realización de esta tesis. A mis padres y hermanos que me apoyaron siempre en los momentos más difíciles. Al ejército, BING CONST N°4, por haberme formado con valores éticos y morales. A la empresa Manutata cuna de mi formación profesional. A la empresa candela Perú, por haberme dado la oportunidad de ejercer mi labor como Ing. Agroindustrial. Y también agradecimiento infinito a todos aquellos que motivaron y estuvieron pendientes de esta tesis.

**DAVID**

Gracias Dios, gracias por siempre estar ahí. Enderezaste mi vida y me llevaste por el camino correcto, gracias por eso que me permitido culminar esta investigación y cumplir una de mis más grandes metas.

A mi madre Lorenza por confiar siempre en mí, por respetar cada decisión que tomé en mi vida y por alimentarme cada día que estuve contigo, te amo madre mía, mujer de hierro.

A mi padre Daniel. Nunca tuve las mejores cosas materiales que en un momento quise, pero nunca me faltó lo más importante que debe existir en un hogar, realmente tome muy en serio aquellas palabras que me dijiste “tú tienes que ser mejor que yo”, tenía 10 años, pero hoy te puedo decir que soy el mejor porque me siento así.

A mi hermana Blanca, siempre quise alcanzarte, pero aún me falta mucho por recorrer eres la mejor hermana, lo eres, y eres la persona que me dio lo justo y necesario para este largo y hermoso viaje que fue la universidad.

Al M.Sc. Palmer Vicente Pulla Huilca, por el asesoramiento de este trabajo de investigación, a la ing. Flor Karina Huamán Quispe por el apoyo constante al trabajo de investigación.

A la Universidad Nacional Amazónica De Madre De Dios por abrirme sus puertas

A mis profesores por darme los conocimientos necesarios para ser un profesional y marcar la diferencia.

**CHRISTOPHER**

## PRESENTACIÓN

La presente investigación, fue realizado con harina de torta de castaña (*Bertholletia Excelsa, H.B.K.*), dicha harina es un derivado de la nuez de castaña de tercera (Broken), es usado mayormente en la elaboración de alimentos balanceados para peces como paco, gamitana y otros. Sin embargo, no existen estudios concretos sobre las condiciones de un buen almacenamiento, ya que de este depende el nivel comercial que puede alcanzar estos productos.

Es así, que se vio la necesidad de plantear la siguiente investigación, “Evaluación de las isotermas de adsorción de harina de torta de castaña (*Bertholletia Excelsa, H.B.K.*)”, se obtendrán datos importantes y relevantes, como, la evaluación de las condiciones adecuadas en cuanto a T° y HR para almacenar y garantizar su mayor tiempo de vida útil sin que se vea afectada su calidad.

En la presente investigación se desarrolla 03 capítulos. CAPITULO I: desarrollo de la parte teórica: teoría sobre la nuez, antecedentes para realizar dicha investigación y autores referentes en cuanto a las isotermas de adsorción. CAPITULO II: materiales y métodos: en este capítulo se describe los materiales, equipos, reactivos y los métodos empleados en la presente tesis. CAPITULO III: resultados y discusiones: se presentan los resultados obtenidos, se interpreta mediante gráficos y ecuaciones. Así mismo se analiza cada parámetro obtenido en la parte experimental.

## RESUMEN

Esta investigación tuvo de propósito, la evaluación de las isothermas de adsorción de harina de torta de castaña (*Bertholletia excelsa*, H.B.K.), los gráficos fueron obtenidos a 35°C, 45°C y 55°C respectivamente, usando el método gravimétrico estático, a "aw" de 0.0979 a 0.8880. Los gráficos obtenidos mostraron similitud a las isothermas del tipo II, característico de materiales ricos en proteínas. Para una determinada temperatura  $X_e$  aumento con el incremento de la actividad de agua, lo que se asemeja a la mayoría de alimentos agrícolas. Los datos obtenidos experimentalmente se ajustaron a "6" modelos matemáticos usuales en isothermas de alimentos (BET, GAB, Halsey, Oswin, Chung-Pfost y Henderson). Los modelos GAB y Oswin son modelos más acertados para representar a las isothermas de adsorción de harina de torta de castaña, presentando un  $R^2$  GAB 0.9571 y OSWIN 0.9848, y el porcentaje promedio de error relativo porcentual GAB 4.6077% y OSWIN 8.0127%.

La humedad de monocapa de GAB es dependiente de la temperatura, que disminuye de 0.0539 a 0.0324 (gr H<sub>2</sub>O / gr masa seca) a 35°C, 45°C y 55°C. se halló los valores de  $X_e$  con el modelo que mejor ajustó a las isothermas que en este caso es GAB para así determinar los valores de "qst" aplicando la fórmula de Clausius-Clapeyron, se observó que el valor de qst decrece conforme el contenido de humedad en la torta de castañas harina aumenta desde 11.7631 hasta -0.2819 kJ / mol, en humedades desde 0.0299 hasta 0.1057 (gr H<sub>2</sub>O / gr masa seca), en el rango de temperaturas estudiadas. Asimismo, "Ea" (energía de activación) fue calculado por la fórmula de Arrhenius, esto indicó cuan dependientes son los parámetros  $X_m$ , C, K de GAB versus las temperaturas de estudio, los valores son 21.167 kJ / mol, 95.495 kJ / mol y 29.057 kJ / mol, respectivamente. También se observa el efecto de las temperaturas sobre las humedades de monocapa mostrando tendencia negativa, los parámetros KGAB CGAB muestran tendencias positivas.

**Palabras clave:** Harina de torta de castaña (*Bertholletia Excelsa*, H.B.K.), humedad de equilibrio, condiciones de almacenamiento, isothermas de adsorción, modelos matemáticos, calor isostérico de adsorción, energía de activación.



## ABSTRACT

The purpose of this research was to evaluate the adsorption isotherms of chestnut cake flour (*Bertholletia excelsa*, HBK), the graphs were obtained at 35°C, 45°C and 55°C respectively, using the static gravimetric method, at "aw" from 0.0979 to 0.8880. The graphs obtained showed similarity to type II isotherms, characteristic of materials rich in proteins. For a given temperature,  $X_e$  increases with increasing water activity, which is similar to most agricultural foods. The data obtained experimentally were fitted to "6" usual mathematical models in food isotherms (BET, GAB, Halsey, Oswin, Chung-Pfost and Henderson). The GAB and Oswin models are more accurate models to represent the adsorption isotherms of chestnut cake flour, presenting an  $R^2$  GAB 0.9571 and OSWIN 0.9848, and the average percentage relative error GAB 4.6077% and OSWIN 8.0127%.

GAB monolayer moisture is temperature dependent, decreasing from 0.0539 to 0.0324 (gr H<sub>2</sub>O / gr dry mass) at 35°C, 45°C and 55°C. The  $X_e$  values were found with the model that best adjusted to the isotherms, which in this case is GAB in order to determine the values of "qst" applying the Clausius-Clapeyron formula, it was observed that the value of qst decreases as the content of Moisture in chestnut flour cake increases from 11.7631 to -0.2819 kJ / mol, in humidities from 0.0299 to 0.1057 (gr H<sub>2</sub>O / gr dry mass), in the range of temperatures studied. Likewise, "Ea" (activation energy) was calculated by the Arrhenius formula, this indicated how dependent are the parameters  $X_m$ , C, K of GAB versus the study temperatures, the values are 21,167 kJ / mol, 95,495 kJ / mol and 29,057 kJ / mol, respectively. The effect of temperatures on monolayer humidities is also observed, showing a negative trend, the KGAB CGAB parameters show positive trends.

**Keywords:** Chestnut cake flour (*Bertholletia excelsa*, H.B.K.), equilibrium humidity, storage conditions, adsorption isotherms, mathematical models, isosteric heat of adsorption, activation energy.

## ACRÓNIMO

A: Constante A del modelo matemático de Chung Pfost, Halsey y Oswin

$A_w$ : Actividad de agua

$X_e$ : Humedad de equilibrio

B: Constante B del modelo matemático de Chung Pfost, Halsey y Oswin

C: Constante C del modelo matemático de GAB y BET

$E_a$ : Energía de activación

HRE: Humedad relativa

K: Constante K del modelo matemático de GAB y Henderson

Ln: Logaritmo natural

n: Constante n del modelo matemático de Henderson

$R^2$ : Coeficiente de determinación

T: Temperatura

$X_m$ : Humedad de la monocapa

%E: Porcentaje de error

## INTRODUCCIÓN

La harina de torta de castaña es un subproducto de la nuez de castaña, así mismo pertenece a la familia *Lecythidaceae* y se sabe que es originaria de la selva húmeda tropical de la Amazonía.

Se encuentra en la parte sur del Perú y en el departamento de Madre de Dios. La harina de torta de castaña es un producto sucedáneo obtenido a partir de la nuez, usada principalmente para la elaboración de alimento balanceado para peces y otros productos, debido a sus bondades nutricionales, es un producto con aplicaciones importantes y tiene un gran futuro en la parte comercial.

Según la (Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC, 2020), este sub producto contiene proteínas (37.27%), carbohidratos (32.50%) y grasas (6.71%), siendo sensible a condiciones no adecuadas y que conllevan a sufrir reacciones de deterioro, por consiguiente, es necesario realizar una investigación que nos ayude a contribuir en su almacenamiento adecuado. En los alimentos como, harinas es importante la evaluación por el método de isotermas de adsorción, que nos ayude a comprender los parámetros ideales para su almacenamiento (humedad relativa) y en la elección del material adecuado de empaque (para determinar la permeabilidad del empaque). Las isotermas de adsorción evalúan la condiciones(°T Y HR) óptimas de almacenaje, que son necesarios para el diseño, modelamiento y optimización de procesos como aireación, enfriado y el almacenamiento de productos alimenticios **(Choque-Quispe et al., 2019)**.

Este trabajo tiene como objetivo primordial, la evaluación de las isotermas de adsorción de harina de torta de castaña, para lograr esto se tiene otros objetivos como; Evaluar “Xe” (Humedad de equilibrio) del producto; Obtener los parámetros de cada modelo matemático a 35°C, 45°C y 55°C, y “aw” de 0.0979 hasta 0.8880; Evaluar “Xm” (Humedad de monocapa); Evaluar “qst” (calor isostérico de adsorción) y finalmente Evaluar la energía de activación.

# ÍNDICE

|  |          |
|--|----------|
| <b>CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b> .....                             | <b>1</b> |
| 1.1. Descripción del problema .....  | 1        |
| 1.2. Formulación del problema.....   | 2        |
| 1.3. Objetivos.....  | 2        |
| 1.3.1. Objetivo principal .....  | 2        |
| 1.3.2. Objetivos específicos .....   | 2        |
| 1.4. Variables .....   | 3        |
| 1.4.1. Variables Independientes .....  | 3        |
| 1.4.2. Variables dependientes.....   | 3        |
| 1.5. Operacionalización de variables.....                                      | 3        |
| 1.1. Hipótesis.....  | 4        |
| 1.2. Justificación.....  | 4        |
| <b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....  | <b>6</b> |
| 2.1. Antecedentes de estudio .....   | 6        |
| 2.2. La Castaña nombre científico ( <i>Bertholletia Excelsa, H.B.K.</i> ) .... | 9        |
| 2.2.1. Origen de la castaña. ....  | 9        |
| 2.2.2. Clasificación Taxonómica. ....  | 9        |
| 2.2.3. Nombres comunes .....   | 10       |
| 2.2.4. Características botánicas.....  | 10       |
| 2.2.5. Características agronómicas .....                                       | 11       |
| 2.2.6. El fruto .....  | 11       |
| 2.2.7. Las semillas (nueces de castaña en cascara) .....                       | 12       |
| 2.2.8. Composición química de la nuez.....                                     | 12       |
| 2.2.9. Usos de la nuez.....  | 13       |
| 2.3. Harina de torta de castaña.....   | 13       |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| 2.3.1.   | Composición nutricional de la Harina de torta de castaña...    | 14        |
| 2.3.2.   | Composición de aminoácidos de Harina de torta de castaña ..... | 14        |
| 2.4.   | Isotermas de adsorción.....                                    | 15        |
| 2.4.1.   | Clasificación de las isotermas de adsorción .....              | 16        |
| 2.4.2.   | Efecto de la temperatura en las isotermas de adsorción.....    | 18        |
| 2.5.   | Modelamiento de las isotermas de adsorción.....                | 19        |
| 2.5.1.   | Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y De Bóer).....            | 20        |
| 2.5.2.   | Modelo BET de Brunauer, Emmet y Teller.....                    | 20        |
| 2.5.3.   | Modelo de Halsey .....   | 21        |
| 2.5.4.   | Modelo de Oswin .....  | 21        |
| 2.5.5.   | Modelo de Henderson.....                                       | 21        |
| 2.5.6.   | Modelo de Chung-Pfost.....                                     | 22        |
| 2.6.   | “qst” Calor isostérico de adsorción .....                      | 22        |
| 2.7.   | “Ea” Energía de activación.....                                | 24        |
| 2.8.   | Almacenamiento.....  | 26        |
| 2.8.1.   | Temperatura (°T).....  | 26        |
| 2.8.2.   | “HR” Humedad relativa del ambiente.....                        | 27        |
| 2.8.3.   | Composición de la atmosfera.....                               | 27        |
| <b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b> |  | <b>29</b> |
| 3.1.   | Tipo de estudio.....   | 29        |
| 3.2.   | Diseño del estudio .....                                       | 29        |
| 3.3.   | Materiales y equipos.....                                      | 29        |
| 3.3.1.   | Materia prima.....   | 29        |
| 3.3.2.   | Reactantes (sales) .....                                       | 29        |
| 3.3.3.   | Equipos .....  | 29        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 3.3.4.  | <b>Materiales.....</b>   | <b>30</b> |
| 3.3.5.  | <b>Limpiadores y desinfectantes químicos .....</b>   | <b>30</b> |
| 3.4.  | <b>Métodos y técnicas .....</b>  | <b>30</b> |
| 3.4.1.  | <b>Lugar de ejecución .....</b>  | <b>30</b> |
| 3.4.2.  | <b>Obtención de harina de torta de castaña.....</b>  | <b>30</b> |
| 3.5.  | <b>Acondicionamiento de la harina de torta de castaña.....</b>   | <b>32</b> |
| a)  | <b>Obtención de las humedades relativas.....</b>   | <b>35</b> |
| b)  | <b>Obtención de “Xe” humedad de equilibrio.....</b>  | <b>36</b> |
| c)  | <b>Obtención de “Xm” humedad de monocapa.....</b>  | <b>37</b> |
| 3.5.1.  | <b>Obtención de “qst” calor isostérico de adsorción.....</b>   | <b>37</b> |
| 3.5.2.  | <b>Obtención de “Ea” energía de activación.....</b>  | <b>37</b> |
| 3.6.  | <b>Tratamiento de datos.....</b>   | <b>38</b> |
| 3.6.1.  | <b>Técnica de determinación de datos.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....</b> |  | <b>39</b> |
| 4.1.  | <b>Análisis fisicoquímico de la harina de torta de castaña<br/>(<i>Bertholletia excelsa</i> H.B.K.).....</b> | <b>39</b> |
| 4.2.  | <b>Humedad de equilibrio .....</b>   | <b>39</b> |
| 4.3.  | <b>Isotermas de Adsorción .....</b>  | <b>41</b> |
| 4.4.  | <b>Modelado Matemático para la Harina de Torta de Castaña<br/>(<i>Bertholletia excelsa</i>, H.B.K.).....</b> | <b>43</b> |
| 4.4.1.  | <b>Ajuste de modelos matematicos .....</b>   | <b>45</b> |
| 4.5.  | <b>Evaluación de los parámetros obtenidos.....</b>   | <b>54</b> |
| 4.5.1.  | <b>Evaluación del parámetro “Xm” de GAB.....</b>   | <b>54</b> |
| 4.5.2.  | <b>Evaluación del parámetro “C” de GAB.....</b>  | <b>56</b> |
| 4.5.3.  | <b>Evaluación del parámetro “K” de GAB.....</b>  | <b>57</b> |
| 4.5.4.  | <b>Evaluación del parámetro “A” de OSWIN .....</b>   | <b>58</b> |

|   |     |
|---|-----|
| 4.5.5. Evaluación del parámetro “B” de OSWIN .....  | 60  |
| 4.6. Calor Isostérico de Adsorción (qst) .....  | 61  |
| 4.6.1. Representación lineal de $-\ln(a_w)$ frente a $1/T$ de la ecuación de Clausius-Clapeyron .....       | 62  |
| 4.6.2. Efecto de $X_e$ en qst aplicando la ecuación de TSAMI .....  | 63  |
| 4.7. Energía de activación ( $E_a$ ) .....  | 65  |
| 4.7.1. Obtención de $E_a$ del parámetro “ $X_m$ ” de GAB .....  | 65  |
| 4.7.2. Obtención de $E_a$ de del parámetro “C” de GAB .....   | 67  |
| 4.7.3. Obtención de $E_a$ de del parámetro “K” de GAB .....   | 68  |
| CONCLUSIONES.....   | 70  |
| SUGERENCIAS .....   | 72  |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 73  |
| ANEXOS.....   | 82  |
| ANEXO 1: Matriz de Consistencia .....   | 83  |
| ANEXO 2: Instrumento .....  | 85  |
| ANEXO 3: Fotografías del trabajo de investigación .....   | 86  |
| ANEXO 4: Cálculo de los parámetros para cada modelo mediante el software STATISTICA versión 10.0.228.8..... | 95  |
| ANEXO 5: Cálculo del error relativo porcentual para cada modelo y para cada temperatura .....               | 101 |

## ÍNDICE DE TABLAS:

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Operacionalización de variables para las isotermas de adsorción ...                                 | 3  |
| <b>Tabla 2.</b> Información nutricional de la Torta de Castaña .....  | 14 |
| <b>Tabla 3.</b> Composición de aminoácidos de harina de torta de castaña .....                                      | 14 |
| <b>Tabla 4.</b> Temperaturas óptimas para el crecimiento microbiano .....   | 26 |
| <b>Tabla 5.</b> Cantidad recomendada de sal y agua para preparar solución salina saturada. ....                     | 34 |
| <b>Tabla 6.</b> Ecuaciones de las sales utilizadas para la obtención de aw a las temperaturas de estudio.....       | 35 |
| <b>Tabla 7.</b> Humedades relativas (%) de cada solución salina en base a las temperaturas estudiadas.....          | 36 |
| <b>Tabla 8:</b> análisis fisicoquímico del producto estudiado.....  | 39 |
| <b>Tabla 9.</b> humedades de equilibrio (Xe) de harina de torta de castaña versus actividad del agua (aw).....      | 40 |
| <b>Tabla 10.</b> Parámetros obtenidos a distintos modelos matemáticos a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C.....      | 44 |
| <b>Tabla 11.</b> El ajuste de datos en el modelo GAB a 35°C, 45°C y 55°C. ....                                      | 45 |
| <b>Tabla 12.</b> El ajuste de datos en el modelo CHUNG PFOST a 35°C, 45°C y 55°C.....                               | 47 |
| <b>Tabla 13.</b> El ajuste de datos en el modelo HALSEY a 35°C, 45°C y 55°C. .                                      | 48 |
| <b>Tabla 14.</b> El ajuste de datos en el modelo OSWIN a 35°C, 45°C y 55°C.....                                     | 50 |
| <b>Tabla 15.</b> El ajuste de datos en el modelo BET a 35°C, 45°C y 55°C. ....                                      | 51 |
| <b>Tabla 16.</b> El ajuste de datos en el modelo HENDERSON a 35°C, 45°C y 55°C. ....                                | 53 |
| <b>Tabla 17.</b> Datos de las temperaturas y las humedades de monocapa Xm obtenidos a partir del modelo de GAB..... | 54 |
| <b>Tabla 18.</b> Datos de las temperaturas y los parámetros “C” obtenidos a partir del modelo de GAB.....           | 56 |
| <b>Tabla 19.</b> Datos de las temperaturas y los parámetros “K” obtenidos a partir del modelo de GAB.....           | 57 |
| <b>Tabla 20.</b> Datos de las temperaturas y los parámetros “A” obtenidos a partir del modelo de OSWIN.....         | 58 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 21.</b> Datos de las temperaturas y los parámetros “B” obtenidos a partir del modelo de OSWIN. ....                 | 60 |
| <b>Tabla 22.</b> calor isostérico de adsorción (qst) de harina de torta de castaña a distintas humedades de equilibrio. .... | 61 |
| <b>Tabla 23.</b> Valores de q0, X0 y R2 ajustados a la ecuación de TSAMI. ....   | 64 |
| <b>Tabla 24.</b> Parámetros del modelo GAB a varias temperaturas. ....   | 65 |
| <b>Tabla 25.</b> Datos de Ln (Xm) (humedad de monocapa) versus 1/T(K-1) (el inverso de las temperaturas).....                | 65 |
| <b>Tabla 26.</b> Datos de Ln (C) (parámetro “C”) versus 1/T(K-1) (el inverso de las temperaturas).....                       | 67 |
| <b>Tabla 27.</b> Datos de Ln (K) (parámetro “K”) versus 1/T(K-1) (el inverso de las temperaturas).....                       | 68 |

## ÍNDICE DE FIGURAS:

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. árbol de Castaña ( <i>Bertholletia Excelsa</i> , H.B.K.).  | 10 |
| Figura 2. fruto de Castaña ( <i>Bertholletia Excelsa</i> , H.B.K.).  | 11 |
| Figura 3. Nueces de Castaña en cascara   | 12 |
| Figura 4. Harina de torta de Castaña   | 13 |
| Figura 5. Isotermas de adsorción de harina de maca a temperatura de 25°C ajustadas a los modelos de GAB, BET, CAURIE Y HENDERSON | 15 |
| Figura 6. Seis tipos de Isotermas de adsorción.  | 17 |
| Figura 7. Influencia de la temperatura en las curvas de la isoterma de adsorción de vapor de agua.                               | 19 |
| Figura 8. Gráfico del inverso de las temperaturas versus el logaritmo natural de aw relacionada con la humedad.                  | 23 |
| Figura 9. Cambios de energía en el paso de transformación de reactivos a producto.   | 25 |
| Figura 10. Flujograma para obtener la harina de torta de Castaña   | 31 |
| Figura 11. Diagrama de equipos para la evaluación de las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña.                | 33 |
| Figura 12: Flujograma para la evaluación de las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña.                         | 34 |
| Figura 13. Isotermas de adsorción de harina de torta de castaña ( <i>Bertholletia excelsa</i> H.B.K.) a 35°C, 45°C y 55°C.       | 41 |
| Figura 14. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de GAB para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.                  | 46 |
| Figura 15. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de CHUNG PFOST para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.          | 47 |
| Figura 16. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de HALSEY para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.               | 49 |
| Figura 17. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de OSWIN para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.                | 50 |
| Figura 18. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de BET para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.                  | 52 |
| Figura 19. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de HENDERSON para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.            | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 20. Gráfico de las temperaturas y las humedades de monocapa $X_m$ obtenidos a partir del modelo de GAB.....   | 55 |
| Figura 21. Gráfico de las temperaturas y los parámetros “C” obtenidos a partir del modelo de GAB.....  | 56 |
| Figura 22. Gráfico de las temperaturas y los parámetros “K” obtenidos a partir del modelo de GAB.....  | 58 |
| Figura 23. Gráfico de las temperaturas y los parámetros “A” obtenidos a partir del modelo de OSWIN.....  | 59 |
| Figura 24. Gráfico de las temperaturas y los parámetros “B” obtenidos a partir del modelo de OSWIN.....  | 60 |
| Figura 25. Gráfico de $-\ln(a_w)$ versus $1/T$ para calcular el $q_{st}$ de harina de torta de castaña para distintas humedades de equilibrio ( $X_e$ ). .....                   | 62 |
| Figura 26. Efecto de $X_e$ en $q_{st}$ para harina de torta de castaña. ....   | 63 |
| Figura 27: Grafico de la influencia de $\ln(X_m)$ versus $1/T$ ( $K^{-1}$ ).....   | 66 |
| Figura 28. Gráfico de la influencia de $\ln(C)$ versus $1/T$ ( $K^{-1}$ ). .....   | 67 |
| Figura 29. Gráfico de la influencia de $\ln(K)$ versus $1/T$ ( $K^{-1}$ ).....   | 68 |
| Figura 30. Molienda de harina de torta de castaña en molino industrial .....   | 86 |
| Figura 31. Torta de castaña extraído de la prensa y sin aceite .....   | 87 |
| Figura 32. Harina de torta de castaña secándose en la estufa .....   | 88 |
| Figura 33. Muestra de harina de torta de castaña para la determinación de humedad .....  | 89 |
| Figura 34. Envasado de harina de torta de castaña en bolsas de polipropileno .....   | 89 |
| Figura 35. Muestra de harina de torta de castaña en balanza analítica para determinación de humedad.....   | 90 |
| Figura 36. muestra de harina de torta de castaña sometida a diferentes temperaturas $35^{\circ}C$ , $45^{\circ}C$ y $55^{\circ}C$ en el equipo de refrigeradora-incubadora. .... | 91 |
| Figura 37. Sales en frascos para la evaluación de isotermas de adsorción. ....   | 91 |
| Figura 38. Almacenamiento de la muestra refrigeradora-incubadora. ....   | 92 |
| Figura 39. muestra de harina de torta de castaña para la determinación de humedad en campana desecadora. ....  | 93 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 40. Determinación de humedad de muestras de harina de torta de castaña en el equipo de METTLER TOLEDO. .... | 94 |
|--|----|

## CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Descripción del problema

Las castañas se distribuyen de forma natural, y en cantidades que solo es aprovechable en Madre de Dios, donde hay aproximadamente. 2 millones de hectáreas y 1,6 millones de árboles, con una densidad promedio de 0,6 árboles / ha, Bolivia tiene 10 millones de hectáreas con una densidad de 1,2 árboles / ha, y Brasil tiene 300 millones de hectáreas **(Miró Agurto, 2018)**.

La región de Madre de Dios tiene la mayor concentración de castañas del país. Hasta el momento, ha obtenido 1,15 millones de hectáreas de concesiones de uso sostenible. Es bien sabido que en Canadá y otros países del norte la castaña cuesta a US \$ 40 el kg, hace años el Perú ha firmado con la Unión Europea el tratado de libre comercio, y la castaña se convertiría en uno de los productos que se beneficiaría del acuerdo. En promedio, un árbol adulto puede producir unos 80 kg de castañas con cáscara, lo que equivale a unos 25 kg de castañas peladas **(Reyna Ramos, 2020)**.

Según **(Chirinos, 2015)** La torta de castaña es un subproducto generado de la extracción de aceite, ya sea de castaña de 1era entera, 2da chipped o 3ra broken, sirve de insumo en dietas balanceadas para alimentar a peces como paco y gamitana en la etapa juvenil, ya que obtuvo mejoras en el crecimiento de estas especies. La torta de castaña es muy nutritiva por su alto contenido de proteína, aminoácidos esenciales, y otros nutrientes.

Existe una amplia aplicación en la gastronomía, panadería, pastelería y galletas fortificadas con harina de torta de castaña **(Chavez Tarazona, 2017)**.

En la tesis de **(Stockler-Pinto et al., 2015)** concluyó que el aumento del nivel de selenio a través de la suplementación con castañas (*Bertholletia Excelsa, H.B.K.*) está relacionado con la mejora de los niveles de hormona tiroidea en pacientes en hemodiálisis. Por lo tanto, las tortas también se utilizan en el enriquecimiento de alimentos, ya que desempeñan un papel importante en la

salud humana.

Según **(Jimenez Aguirre y Duque De La Cruz, 2018)**, las harinas son altamente higroscópicas, el alto contenido de humedad conlleva al deterioro del producto. Este sub producto contiene proteínas (37.27%), carbohidratos (32.50%) y grasas (6.71%) resultados obtenidos en; (Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC, 2020). Así mismo, siendo sensible a condiciones no adecuadas y que conllevan a sufrir reacciones de deterioro, por consiguiente, es necesario realizar una investigación que nos ayude a contribuir en su almacenamiento adecuado.

Las características de la isoterma de adsorción permiten la evaluación de las condiciones de almacenamiento esenciales para el diseño, modelado y optimización de procesos como la aireación, enfriado y almacenamiento de productos alimenticios **(Choque-Quispe et al., 2019)**.

Es así, que se vio la necesidad de plantear la siguiente investigación, “Evaluación de las isotermas de adsorción de harina de torta de castaña (*Bertholletia Excelsa, H.B.K.*)”, se obtendrán datos importantes y relevantes, como, la evaluación de las condiciones ( $^{\circ}T$  y HR) óptimas para su almacenaje para garantizar su mayor tiempo de vida útil sin que se vea afectada su calidad.

## **1.2. Formulación del problema**

¿La evaluación de las isotermas de adsorción contribuirá con las condiciones óptimas en su almacenamiento (humedad y temperatura) de harina de torta de castaña (*Bertholletia Excelsa, H.B.K.*)?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo principal**

- Evaluar las isotermas de adsorción para que contribuya con las condiciones propicias de almacenaje de harina de torta de castaña.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Evaluar “**Xe**” (Humedad de equilibrio) (gr H<sub>2</sub>O/ gr masa seca) del producto.
- Obtener los parámetros de cada modelo matemático a 35°C, 45°C y 55°C, y “**aw**” de 0.0979 hasta 0.8880.

- Evaluar “**X<sub>m</sub>**” (Humedad de monocapa) (gr H<sub>2</sub>O/ gr masa seca) del producto.
- Evaluar “**q<sub>st</sub>**” (calor isostérico de adsorción)
- Evaluar la energía de activación.

#### 1.4. Variables

##### 1.4.1. Variables Independientes

- <sup>a</sup> Temperaturas de: 35°C, 45°C y 55°C.
- <sup>b</sup> Humedades relativas desde 9.79% hasta 88.80%.

##### 1.4.2. Variables dependientes

- “**X<sub>e</sub>**” (Humedad de equilibrio) (gr H<sub>2</sub>O/ gr masa seca)
- “**X<sub>m</sub>**” (Humedad de monocapa) (gr H<sub>2</sub>O/ gr masa seca)

#### 1.5. Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables para las isotermas de adsorción

| TIPO DE VARIABLE         | DIMENSIONES   | INDICADOR    | UNIDAD DE MEDIDA |
|--------------------------|---|--------------|------------------|
| VARIABLES INDEPENDIENTES | Temperatura   | 35, 45 y 55  | °C               |
|                          | Humedad relativa                                      | 9.79 a 88.80 | %                |
| VARIABLES DEPENDIENTES   | Humedad de equilibrio (X <sub>e</sub> )               | ninguno      | g agua/g m.s.    |
|                          | Humedad de la monocapa del producto (X <sub>m</sub> ) | ninguno      | g agua/g m.s.    |

<sup>a</sup> La temperatura de 35°C fue obtenida mediante una estufa. También se tomó como referencia la tesis de (Gutierrez Balarezo, 2014), que realizó estudios sobre isotermas de adsorción de harina de plátano.

<sup>b</sup> Las humedades relativas de las sales están detalladas en el ítem 3.5 inciso a) en la Tabla 7.

### 1.1. Hipótesis

**H:** La evaluación de las isotermas de adsorción **determinará** las condiciones (humedad y temperatura) optimas de almacenamiento de harina de torta de castaña.

**H0:** La evaluación de las isotermas de adsorción **no determinará** las condiciones (humedad y temperatura) optimas de almacenamiento de harina de torta de castaña.

### 1.2. Justificación

La harina de torta de castaña puede sufrir deterioro en cuanto las condiciones de almacenamiento de humedad y temperatura. En la presente investigación se obtendrán parámetros importantes y relevantes mediante el modelado matemático de 6 modelos ampliamente aplicados en alimentos y finalmente se obtendrán las humedades relativas de ambientes y temperaturas adecuadas para garantizar su mayor tiempo de vida útil de la harina de torta de castaña sin que se vea afectada su calidad. La importancia de esta investigación se basa para comprender los parámetros ideales para su almacenamiento (humedad relativa y temperatura) y así poder elegir materiales adecuados de empaque, los parámetros de las isotermas son de gran ayuda para determinar la permeabilidad del empaque, también son necesarios para el diseño, modelamiento, optimización de procesos como la aireación, enfriado y almacenamiento de productos alimenticios (**Carvalho Lago y Zapata Noreña, 2015; Chirinos Ochoa, 2015; Jimenez Aguirre y Duque De La Cruz, 2018; Choque-Quispe et al., 2019**).

Las isotermas de adsorción es necesario para la predicción de vida útil y para determinar la humedad y “**aw**” (actividad de agua) para la aceptabilidad de productos que se deterioran, principalmente debido a la ganancia de humedad y también para el secado, envasado y almacenamiento de estos (**Carvalho Lago y Zapata Noreña, 2015**).

(**Comaposada, Gou y Arnau, 2015**) indican que “**aw**” indica la presencia de agua en los alimentos y hace que ocurran interacciones químicas, bioquímicas (oxidación de grasas, Reacción enzimática, reacción de Maillard) y desarrollo de microorganismos. Esta es la razón por la que la “**aw**” (actividad de agua)



es un indicador ampliamente utilizado para determinar el tiempo de vida útil de los productos alimenticios. La finalidad de este estudio radica en evaluar las condiciones **(HR y °T)** óptimas de almacenaje, es por eso que la harina de torta de castaña al ser un sub producto generado de la extracción de aceite como lo indica **(Chirinos, 2015)** e higroscópico tal como lo mencionan **(Jimenez Aguirre y Duque De La Cruz, 2018)**, puede sufrir deterioro en cuanto las condiciones **(HR y °T)** optimas de almacenaje, es así que es importante la realización de la presente tesis, así mismo será de gran ayuda para elegir los materiales para el empaque adecuado (para determinar la permeabilidad del empaque) y en su almacenamiento (para alargar su vida útil). Ya que debido a sus características representaría una fuente importante de ingresos para los productores.

La importancia de la conservación de harina de torta de castaña está relacionada con la humedad relativa del ambiente, la temperatura, empaque, el envasado, el sellado al vacío y un ambiente inocuo. Este producto tiene un alto contenido de grasa y es propenso a enranciarse. Se recomienda utilizar bolsas de polipropileno de alta densidad para evitar que el producto se humedezca. También es mejor usar bolsas de papel oscuro para evitar la rancidez. La cantidad mínima de aceite contenida en la harina de torta de castaña puede provocar rancidez, los parámetros a tener en cuenta para el correcto almacenamiento en cuanto a la humedad y temperatura de la harina de torta de castaña son mencionados en los resultados y conclusiones de la presente investigación.

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de estudio

La investigación es relevante porque está asociada con un tema importante y también tiene características únicas que la distinguen de otros temas de la misma categoría. En la tesis de **(Huaman Yuca, 2016)** trata de harina de castaña sin desgrasar, esta harina mantiene las características de la nuez de castaña. En la presente investigación tratamos acerca de la harina de torta de castaña es decir se desgrasó la castaña mediante prensado hidráulico, esto cambia las características de la nuez de castaña sobre todo en cantidad de grasa. Esta investigación es relevante en las condiciones óptimas de almacenaje como “HR y °T” (humedad relativa y temperatura) que serán requeridos en la industria de harina de torta de castaña. A continuación, se visualiza como antecedente la tesis de **(Huaman Yuca, 2016)** y seguidamente otros antecedentes de ámbito nacional e internacional.

**(Huaman Yuca, 2016)** realizó estudios sobre "isotermas de adsorción de harina de castaña" El objetivo fue determinar la adsorción de harina de castaña en el departamento de Madre de Dios, y para ello utilizó tres temperaturas 30°C, 40°C y 50°C, en el intervalo de  $a_w$  0,11 a 0,85, “ $X_e$ ” (humedad de equilibrio) fue determinado mediante el método gravimétrico, se utilizaron cinco modelos matemáticos, los modelos que mejor ajustaron fue GAB y HALSEY, también concluye que, la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 13-17% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 60%.

**(Leonardo Betiol et al., 2020)** realizaron estudios de “isotermas de sorción de siete marcas de jamón curado comercial” con diferente composición química simulando las condiciones de almacenamiento a tres temperaturas. Para ello, los jamones curados en seco se analizaron químicamente y se determinaron las isotermas a 7°C, 17°C y 27°C por el método gravimétrico. Las isotermas de sorción correspondieron a las

características de la isoterma tipo BET III debido al alto contenido de proteínas y compuestos solubles como sales presentes en las muestras. Los datos obtenidos experimentalmente se modelaron por los modelos matemáticos de GAB, Peleg, Oswin y Henderson, el modelo que mejor ajustó fue GAB, ya que presentó el mejor ajuste  $R^2 \geq 0,999$  y la raíz del error cuadrado medio (RMSE)  $\leq 0,023$ . El contenido de "Xe" (humedad de equilibrio) del jamón curado disminuyó al incrementar "°T".

**(Barretto et al., 2019)** realizaron estudios sobre "la influencia de la composición química en las isotermas de desorción de cuatro marcas de jamos cocido comercial" El objetivo fue determinar la desorción de cuatro marcas de jamos cocido comercial, y para ello utilizó temperaturas de 2, 9, 16, 24 y 30°C, en el intervalo de aw 0.061 a 0.92, "Xe" (humedad de equilibrio) fue determinado mediante el método gravimétrico, los modelos que mejor ajustaron fue GAB y PELEG, con R2 GAB: 0.9854 a 0.9939 y "RMSE" (raíz del error cuadrado medio) de 0.3137 a 0.0086. Así mismo para PELEG R2: 0.9960 a 0.9999 y "RMSE" (raíz del error cuadrado medio) de 0.0001 a 0.0075.

**(Choque-Quispe et al., 2019)** realizaron estudios sobre "isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco, Noel Vietmeyer y CICA", para ello utilizaron temperaturas de 18, 20, 25 y 30 °C, en el intervalo de humedad relativa de 10 a 90%, "Xe" (humedad de equilibrio) fue determinado mediante el método gravimétrico, se utilizaron "11" modelos matemáticos, los modelos que mejor ajustaron fue el modelo de Adam y Shove para granos de kiwicha; y el modelo de PELEG para las demás harinas, utilizaron como criterio de ajuste "R<sup>2</sup>" (coeficiente de determinación) y "%E" (error medio relativo).

**(Guevara Paredes, 2015)** realizó estudios sobre "El efecto de la temperatura en las isotermas de adsorción en hojuelas de quinua" El objetivo fue determinar la adsorción de hojuelas de quinua, y para ello utilizó las temperaturas de 25°C y 45°C por 15 días, en el intervalo de aw 0.04 a 0.096, "Xe" (humedad de equilibrio) fue determinado mediante el método gravimétrico, así mismo para la determinación de "Xe" utilizaron el equipo analizador de "aw" Aqualat Lite (AL 1379). Así mismo utilizaron los modelos

matemáticos de GAB, BET, Caurie y Henderson, para la estimación del tiempo de vida útil, empleó el modelo de Heiss y Eichener. Los modelos que mejor ajustaron fue GAB y BET, también concluye que, la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 11% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 60%.

**(Ovalle Focori, 2015)** realizó estudios sobre "isotermas de adsorción de harina de pijuayo" El objetivo fue determinar la adsorción de harina de pijuayo en el departamento de Madre de Dios, y para ello utilizó tres temperaturas 20°C, 30°C y 40°C, en el intervalo de  $a_w$  0,10 a 0,87, "**X<sub>e</sub>**" (humedad de equilibrio) fue determinado por el método gravimétrico estático, se utilizaron seis modelos matemáticos, los modelos que mejor ajustaron fue GAB y HALSEY, también concluye que, la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 14% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 60%.

**(Sahu, Patel y Khokhar, 2021)** realizaron estudios del "Comportamiento de sorción y calor isostérico de productos extruidos enriquecidos con proteínas a base de maíz y mijo" utilizaron temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C bajo una humedad relativa del 11-92%. El producto se desarrolló a partir de una mezcla optimizada de maíz, soja desgrasada, mijo y ñame en una condición óptima de 14% de humedad de alimentación, 110 °C de temperatura del barril y 301 rpm de velocidad del tornillo. Para encontrar "**q<sub>st</sub>**" (calor isostérico de sorción) del producto extruido se utilizó la ecuación de Clausius-Clapeyron. Se encontró que "**EMC**" (humedad de equilibrio) aumentaba con la subida de " $a_w$ " (actividad del agua) en una temperatura particular. La EMC más alta 30,05% se registró a 0,92  $a_w$  y 30 °C de temperatura, mientras que la EMC más baja 2,46% a 0,11  $a_w$  y 60 °C de temperatura. Las isotermas exhiben curvas de Tipo II para cuatro condiciones de temperatura. Se utilizaron seis modelos matemáticos, el modelo que mejor ajustó fue GAB. El calor isostérico neto de sorción varió entre 16.711 y 3.242 kJ/mol dentro del 5–30% del contenido de humedad de la muestra.

## 2.2. La Castaña nombre científico (*Bertholletia Excelsa*, H.B.K.).

### 2.2.1. Origen de la castaña.

(Villacorta Valdivia, 2021) indica que la castaña crece naturalmente en las selvas tropicales del Amazonas en; Perú, Brasil, Bolivia, Colombia y Venezuela.

El (Ministerio del Ambiente - MINAM, 2014) indica que las zonas donde hay mayor densidad de árboles de castaña son denominadas castañales, en el Perú el único departamento que tiene gran cantidad de castañales es el departamento de Madre de Dios con 2.5 millones de hectáreas, que ocupa el 30% de su territorio aproximadamente, es por esto que la castaña es considerada un producto bandera de la región.

(Diario Economía y Gestión, 2018) Indica que el Perú ocupa el segundo puesto en exportación de castaña al mercado internacional de EEUU con el 60% de su producción, el tercero lo ocupa Brasil con el 13% de su producción, el primero lo ocupa Bolivia con el 18% de su producción.

La (Asociación para la Conservación de la Cuenca Amazónica, 2010) indica que en Madre de Dios la recolección de castaña comienza en el mes de noviembre y termina en el mes de junio aproximadamente, es una fuente de economía para la región ya que genera trabajo y es exportada al mercado internacional.

### 2.2.2. Clasificación Taxonómica.

Clasificación según los taxónomos (Humboldt y Bonpland, 1817).

Reino: Plantae

Subreino: Tracheobionta

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Subclase: Dilleniidae

Orden: Ericales

Familia: Lecythidaceae

Subfamilia: Lecythidoideae

Género: *Bertholletia*

Especie: *Bertholletia Excelsa*, H.B.K.

### 2.2.3. Nombres comunes

Avellanas brasileñas, castañas, castañas brasileñas, coquito brasileño, nueces amazónicas, nueces bolivianas, castañas de Pará o castañas de montaña (**Comité Técnico Multisectorial de la Castaña - CTMC, 2006**)

### 2.2.4. Características botánicas

(**Larrea-Alcázar et al., 2018**) indica que las características de la castaña son; árbol inmenso con una altura promedio de 30 a 50 metros, su tronco tiene un diámetro de 2 a 4 metros en promedio, es un árbol que podría vivir más de 500 años, en el departamento de Madre de Dios se encontraron árboles de 1200 años, tiene el tronco recto sin ramificaciones y una copa con muchas ramificaciones donde se produce los frutos en forma de cocos, sus hojas presentan forma plana, medianas y oblongas que miden de 20 a 35 centímetros largo y de ancho de 10 a 15 centímetros, sus flores son pequeñas blanquecinas y verdosas, las flores presentan divisiones de dos partes con 6 pétalos de color amarillo.



Figura 1. árbol de Castaña (*Bertholletia excelsa*, H.B.K.).

### 2.2.5. Características agronómicas

(Masats, 2019) indica que los arboles de forma natural crecen en grupos de cantidades promedio de 50 a 100 árboles, a esos grupos se les llama castañales en Madre de Dios-Perú y en Brasil castanhais, su densidad por hectárea en promedio esta de 9 – 26 árboles.

(Masats, 2019) también comenta que para obtener el germinado de una semilla, puede tardar entre 1 y 6 meses en germinar en un semillero y debe ser castaña pelada con mucho cuidado para que pueda germinar sin problemas, sin embargo de manera natural las semillas tardan en germinar bastante en aproximadamente de hasta 3 años, la planta germinada esta lista para trasplantar cuando llegue a una altura de 40 a 60 centímetros, el desarrollo de su raíz en los primeros años de su crecimiento es raíz primaria gruesa, el árbol comienza a dar frutos en 10 a 15 años y su máximo rendimiento cuando llega a los 30 años, el mayor problema de un árbol que no da frutos podría estar relacionado a la falta de abejas polinizadoras.

### 2.2.6. El fruto

El fruto es una cápsula leñosa muy dura, con un grosor medio de 1 cm, esférica o ligeramente achatada. Tiene un diámetro medio de 12 cm, una longitud máxima de 17 cm y un peso de 1,70 kg, con una media de 0,78 kg. Hay un promedio de 18 nueces en el interior, con un espacio de 6-36 semillas, que son triángulos angulares (Cruz Hilacondo, Wilbert; Cuellar Bautista, José Eloy; Ramos León, 2019).



Figura 2. fruto de Castaña (*Bertholletia Excelsa*, H.B.K.).



### 2.2.7. Las semillas (nueces de castaña en cascara)

El tamaño de la semilla es de 3,5-5x2,7-2 cm y pesa 10,2 g. Piel rugosa, almendras lechosas en el interior, cubiertas de piel morena. El producto más valioso son las almendras (**Cruz Hilacondo, Wilbert; Cuellar Bautista, José Eloy; Ramos León, 2019**).



*Figura 3.* Nueces de Castaña en cascara

### 2.2.8. Composición química de la nuez

La castaña presenta características importantes, el más predominante es el fósforo y el menos predominante la vitamina "C" (**Quispe Pucho, 2017**).

| componentes           | Cont./100g   | componentes   | Cont./100g    |
|-----------------------|--------------|---------------|---------------|
| carbohidratos         | 12.27 g      | Vitamina (B6) | 0.101mg (8%)  |
| azucares              | 2.33         | Vitamina C    | 0.7 mg(1%)    |
| Fibra alimentaria     | 7.5          | Vitamina E    | 5.73 mg (38%) |
| grasa                 | 66.43        | Calcio        | 160mg (16%)   |
| proteína              | 14.32        | Hierro        | 2.43mg (19%)  |
| agua                  | 3.48         | Magnesio      | 376mg (102%)  |
| Retinol (vit. A)      | 0            | Fósforo       | 725mg (104%)  |
| Tiamina (vit. B1)     | 0.617        | Potasio       | 659mg (14%)   |
| Riboflavina (vit. B2) | 0.035mg (2%) | Sodio         | 3mg (0%)      |
| Niacina (vit. b2)     | 0.295mg (2%) | Zinc          | 4.06mg (41%)  |

Fuente: (Quispe Pucho, 2017)



### 2.2.9. Usos de la nuez

La castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) se utilizan para diversos fines, entre los que destacan: como aromatizantes, oleorresinas, industria farmacéutica, productos utilizados en el campo de la estética, entre otros, en Brasil es considerada como el “oro del Amazonas”, ya que sus beneficios se extienden mucho más allá de la cocina, llegando a las industrias de la cosmética y farmacéutica porque tiene propiedades beneficiosas para la salud, sus beneficios llamaron la atención de investigadores que a lo largo de las décadas descubrieron su alto poder curativo y antiinflamatorio, extendiéndolo así al uso de medicamentos, considerando que no solo la semilla / fruto sino también sus cáscaras y tronco se utilizan de forma curativa. Además, los estudios lograron transformar los restos de frutos rotos y cáscaras en aceites (pastel de proteínas), fibras, entre otros (**Modesto dos Santos, 2017**).

### 2.3. Harina de torta de castaña

El residuo sólido de la obtención de aceite de nuez de Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K) por prensado se le llama torta (**Gomes Moreira, 2015**), después de haber obtenido la torta se procede a la molienda, esto viene a ser la harina de torta de castaña.

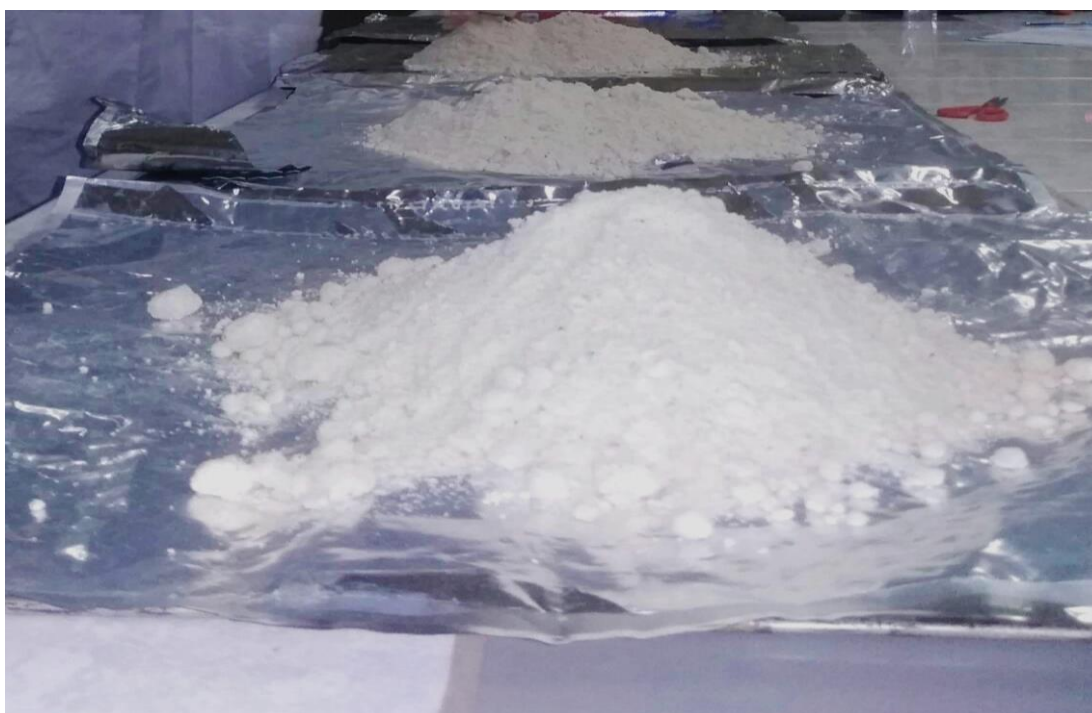


Figura 4. Harina de torta de Castaña

### 2.3.1. Composición nutricional de la Harina de torta de castaña

La harina de castaña es extremadamente nutritiva gracias a su alto porcentaje de proteínas vegetales, con un buen equilibrio entre los aminoácidos esenciales y otros nutrientes. Además, la torta de castaña es un buen sustituto de las dietas equilibradas extruidas para la cría de Paco joven, ya que ha dado un efecto productivo positivo a este tipo de crecimiento (Chirinos Ochoa, 2015).

**Tabla 2.** Información nutricional de la Torta de Castaña

| NUTRIENTES            | LA MOLINA % | CHIRINOS % |
|-----------------------|-------------|------------|
| <b>Humedad</b>        | 8,1         | 13,9       |
| <b>Proteína</b>       | 38,2        | 35         |
| <b>Carbohidratos</b>  | 29,1        | 31.8       |
| <b>Grasa</b>          | 15,7        | 6.9        |
| <b>Ceniza</b>         | 8,9         | 11.4       |
| <b>Fibra</b>          | 7,6         | 1          |
| <b>pH</b>             | NR*         | 6.7        |
| <b>Energía (Kcal)</b> | 410,5       | NR*        |

\* no realizado

Fuente: (Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014; Chirinos Ochoa, 2015)

### 2.3.2. Composición de aminoácidos de Harina de torta de castaña

**Tabla 3.** Composición de aminoácidos de harina de torta de castaña

| Esenciales         | % promedio | No esenciales     | % promedio |
|--------------------|------------|-------------------|------------|
| Fenilalanina (Phe) | 4,71±1,12  | Asparragina (Asx) | 8,34±0,67  |
| Histidina (His)    | 3,21±0,80  | Serina (Ser)      | 5,25±1,40  |
| Lisina (Lys)       | 4,53±0,09  | Glutamina (Glx)   | 19,37±1,04 |
| Valina (Val)       | 6,30±1,26  | Prolina (Pro)     | 2,01±0,29  |
| Metionina (Met)    | 4,27±0,38  | Glicina (Gly)     | 3,38±0,64  |
| Isoleucina (Ile)   | 3,04±0,96  | Alanina (Ala)     | 2,53±0,13  |
| Leucina (Leu)      | 5,10±0,88  | Tirosina (Tyr)    | 2,10±0,45  |
| Treonina (Thr)     | 3,47±0,43  | arginina (Arg)    | 19,46±0,34 |

Fuente: (Barbosa et al., 2018)

La Harina de torta de castaña es rica en aminoácidos esenciales como: valina y leucina, los aminoácidos juegan un papel importante en varias vías metabólicas, sin embargo, no son sintetizados en cantidades suficientes para satisfacer la máxima demanda requerida para la formación, desarrollo y mantenimiento de la salud vascular e intestinal del individuo en desarrollo (Barbosa *et al.*, 2018).

#### 2.4. Isotermas de adsorción

La isoterma de adsorción es una curva graficada mediante la “ $a_w$ ” versus “ $X_e$ ” a una temperatura determinada. Al adsorber un soluto (adsorbente) contenido en un líquido, la concentración del soluto en la fase líquida generalmente se expresa en unidades de masa (ppm, mg / L de soluto) o unidades molares (mmol/ L). La concentración del soluto en el sólido es la masa del soluto adsorbido por unidad de masa del adsorbente (mg del soluto / g del adsorbente) o el número de muelas del adsorbente por unidad de masa del adsorbente (mmol del soluto / del adsorbente) está representado por gr. (Medina *et al.*, 2015).

Las isotermas de adsorción ocurren cuando la cantidad de agua de los alimentos tiende a aumentar, como se muestra en la figura.

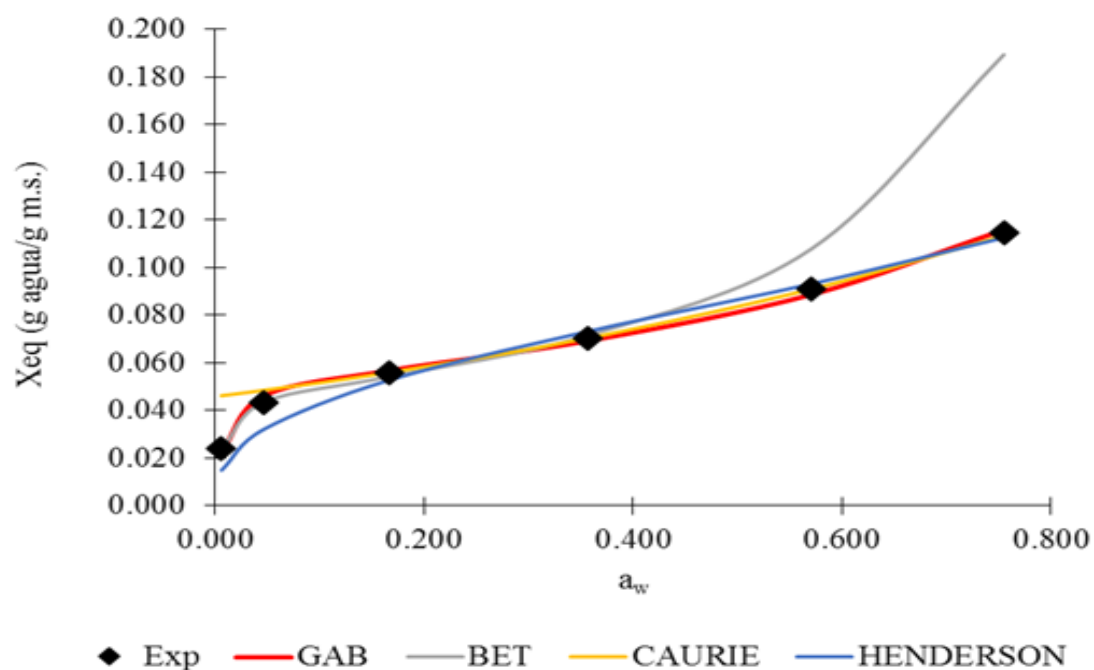


Figura 5. Isotermas de adsorción de harina de maca a temperatura de 25°C

ajustadas a los modelos de GAB, BET, CAURIE Y HENDERSON

Fuente: (Gavidia Rodrigues, 2015)

#### **2.4.1. Clasificación de las isothermas de adsorción**

La clasificación de las isothermas de adsorción muestra que las características de las isothermas están estrechamente relacionadas con la estructura de poros específicos (Thommes *et al.*, 2015).

**Las isothermas de tipo I (a)** están dadas por materiales microporosos con microporos principalmente estrechos (ancho  $<1$  nm).

**Las isothermas de tipo I (b)** se encuentran en materiales con una gama más amplia de tamaños de poros, incluidos microporos más anchos y posiblemente mesoporos estrechos ( $<2,5$  nm).

**La aparición de isoterma reversible tipo II** se debe a la adsorción física de la mayoría de los gases en superficies de adsorción no porosas o macroporosas. El resultado es una adsorción de una sola capa sin restricciones hasta un alto  $w / p_0$ . Una curvatura más suave (es decir, un punto B menos obvio) indica el comienzo de una gran cantidad de superposición de monocapa y adsorción de múltiples capas. Cuando  $p / p_0 = 1$ , el grosor de la multicapa adsorbida normalmente aumentará indefinidamente.

**En el caso de la isoterma de tipo III**, no existe un punto B entonces no se forma una monocapa identificable; la interacción adsorbente-adsorbato es ahora relativamente débil y las moléculas adsorbidas se acumulan en la superficie sólida macroporosa o no porosa. La ventaja en comparación con la isoterma de tipo II, la capacidad de adsorción permanece limitada a la presión de saturación (es decir,  $p / p_0 = 1$ ).

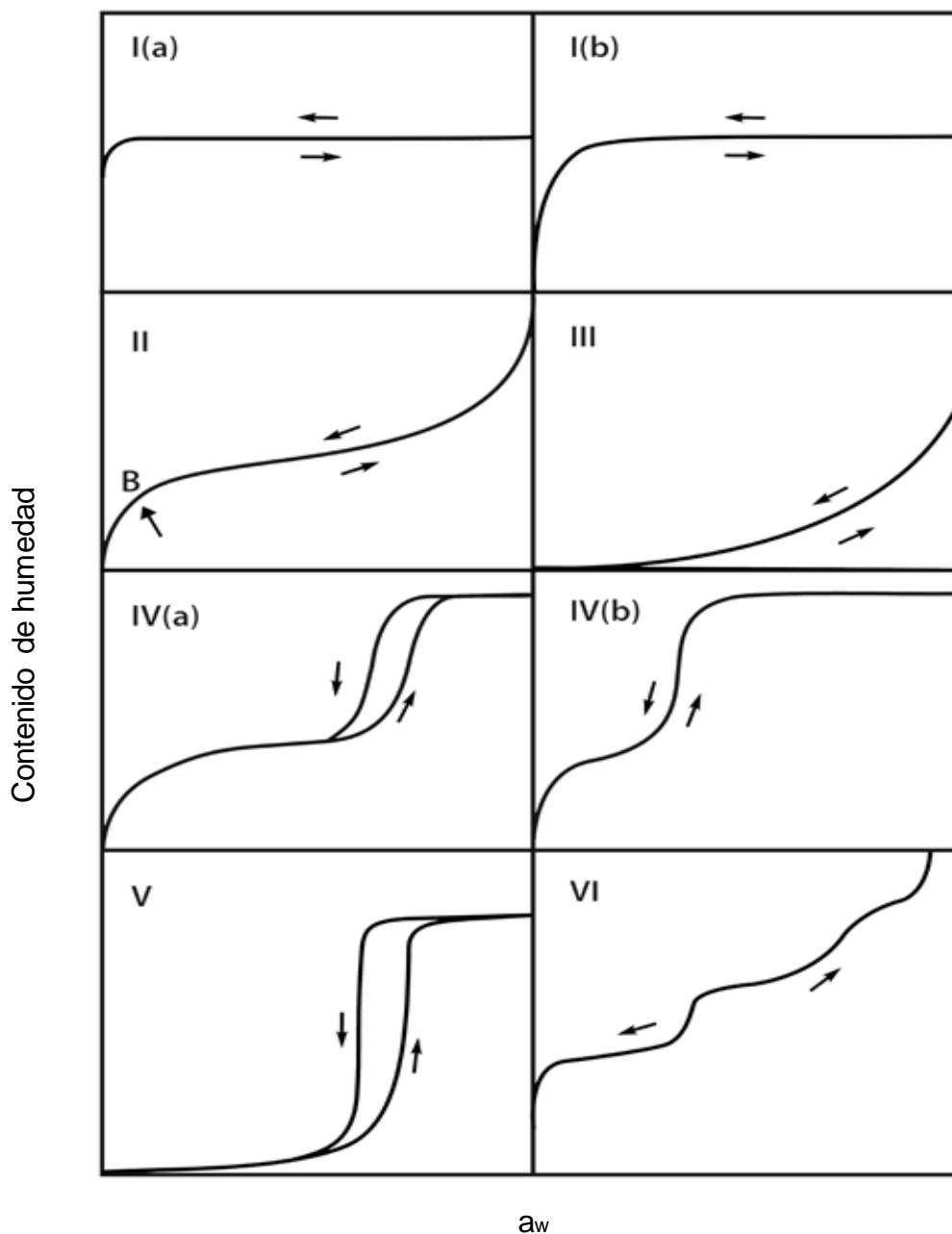


Figura 6. Seis tipos de Isotermas de adsorción.

Fuente: (Thommes *et al.*, 2015)

**Las isotermas de tipo IV** vienen dadas por adsorbentes mesoporosos (geles de óxido, adsorbentes industriales y tamices moleculares mesoporosos).

**En el caso de las isotermas de tipo IVa**, la condensación capilar se acompaña de histéresis. Esto sucede cuando el ancho del poro excede un cierto ancho crítico, dependiendo del sistema de adsorción y la temperatura.

**En principio, las isotermas de tipo IVb** también están dadas por mesoporos cónicos y cilíndricos cerrados en el extremo.

**La isoterma del tipo V** en el rango bajo de  $p / p_0$  es muy similar al tipo III, lo que puede atribuirse a la interacción adsorbente-adsorbente relativamente débil. A mayor peso / peso, la agregación molecular va seguida del llenado de los poros. Por ejemplo, se observan isothermas en forma de V de adsorción de agua sobre adsorbentes hidrófobos microporosos y mesoporosos.

**La isoterma de tipo VI** escalonada reversible representa la adsorción capa por capa sobre una superficie uniforme no porosa. Ahora, la altura de los escalones representa la capacidad de cada capa de adsorción, y la nitidez de los escalones depende del sistema y la temperatura.

#### **2.4.2. Efecto de la temperatura en las isothermas de adsorción**

Dado que la actividad del agua varía con la temperatura y el alimento no es una mezcla ideal, el efecto de la temperatura es muy importante. El movimiento de las moléculas de agua se ve afectado por la temperatura. Debido a la acción continua del agua, el aumento de temperatura reduce la cantidad de agua adsorbida. Algunos azúcares se vuelven más higroscópicos a altas temperaturas, lo que les confiere características a estos azúcares y debido a su pequeña molécula los alimentos se diluyen con agua **(Ovalle Focori, 2015)**.

La siguiente figura muestra la influencia de temperaturas moderadamente elevadas en la isoterma de adsorción, las observaciones experimentales indican que la variación de la temperatura da como resultado una variación modesta en la humedad retenida a una humedad dada. Además, como se observa en la figura, para un incremento de temperatura da como resultado una mayor reducción de la adsorción a mayores humedades (60% RH a 90% RH), que en humedades más bajas (10% RH a 40% RH) **(De Burgh y Foster, 2016)**.

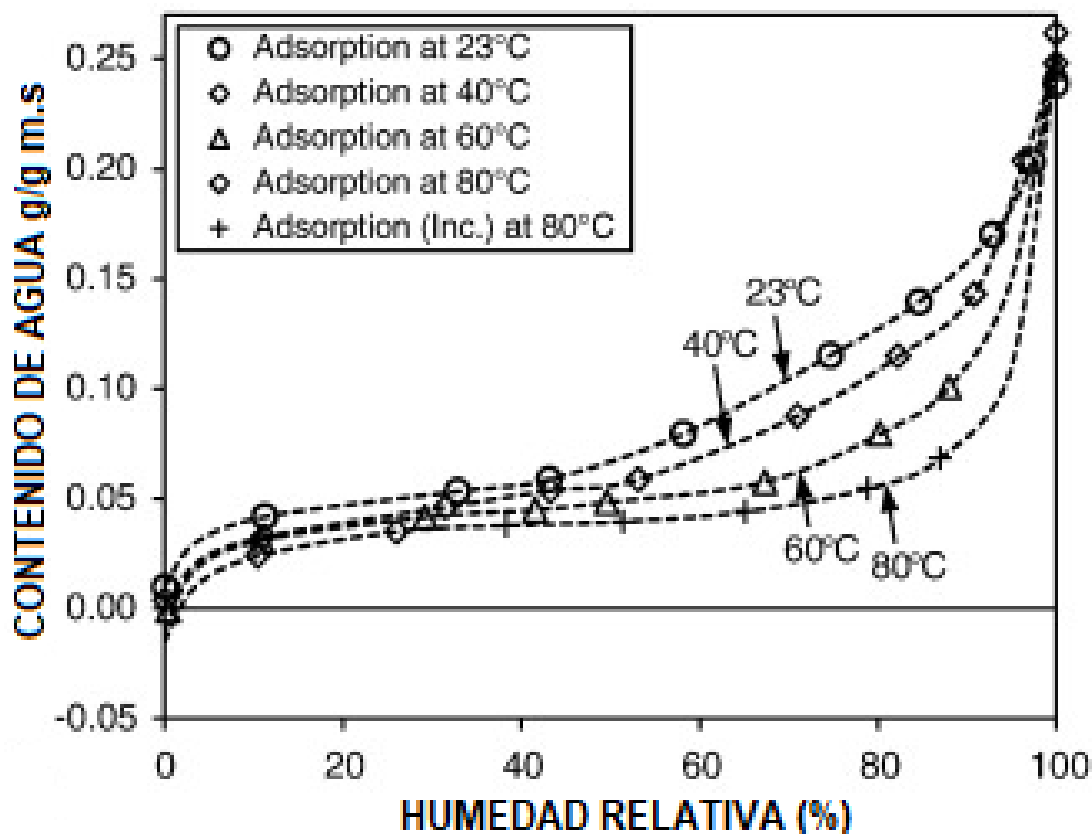


Figura 7. Influencia de la temperatura en las curvas de la isoterma de adsorción de vapor de agua.

Fuente: (De Burgh y Foster, 2016)

## 2.5. Modelamiento de las isotermas de adsorción

Existen muchas fórmulas teóricas, semi-empíricas y experimentales que modelan curvas de adsorción para explicar las isotermas de adsorción de los alimentos. Sin embargo, ningún modelo es aplicable a todas las actividades de agua de los alimentos, esto se debe principalmente al hecho de que la higroscopicidad de las isotermas alimentarias incorpora la higroscopicidad de muchos ingredientes, y la reducción de la **aw** se debe a una mezcla de factores.

La temperatura es un parámetro que a menudo no se considera explícitamente en el modelo isotérmico cuando se consideran a temperatura constante, sin embargo, puede resultar de interés conocer el efecto de la temperatura en la isoterma de adsorción, puesto que de esta manera se podría calcular el calor isostérico de adsorción (Al-Muhtaseb, McMinn y Magee, 2002).

Un modelo típico de isoterma de adsorción correlaciona el contenido de agua de los alimentos con la humedad relativa de equilibrio del medio ambiente. Los modelos matemáticos más utilizados son:

### 2.5.1. Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y De Bóer)

El modelo GAB es usual en productos alimenticios y se utiliza ampliamente para predecir datos de niveles de actividad del agua en el rango de 0,0 hasta 0,9 y proporciona una mejor compatibilidad que la ecuación BET en una amplia gama de contenidos de humedad. El modelo GAB se representa de la siguiente manera.

$$X_e = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \dots \dots \dots (1)$$

**Donde:**

**X<sub>e</sub>:** humedad en equilibrio.

**X<sub>m</sub>:** Humedad de monocapa (gr H<sub>2</sub>O/ g m.s.)

**C:** Constante de Guggenheim, característica del producto y relacionada con el calor de adsorción de la monocapa.

**K:** Es un factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

### 2.5.2. Modelo BET de Brunauer, Emmet y Teller

Este modelo de adsorción multicapa se puede aplicar a una actividad de agua de 0,1 a 0,5. Tiene por objetivo calcular la humedad de monocapa y el calor de adsorción (**Gavidia Rodrigues, 2015**).

$$X_e = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + a_w \cdot (C - 1))} \dots \dots \dots (2)$$

**X<sub>e</sub>:** Humedad de equilibrio (g agua/g m.s.).

**X<sub>m</sub>:** Humedad de la monocapa (g agua/g m.s.).

**a<sub>w</sub>:** Actividad de agua.

**C:** Constante de Guggenheim, característica del producto y relacionada con el calor de adsorción de la monocapa.



### 2.5.3. Modelo de Halsey

Se utiliza para evaluar isotermas de adsorción de diferentes alimentos, con valores de  $a_w$  que van de 0,1 a 0,8 que muestran que es adecuado para productos de almidón como maíz, patatas y trigo. Por otro lado, el modelo Halsey proporciona una ecuación que implica la condensación de agua de múltiples capas a una distancia relativamente larga de la superficie del material.

$$a_w = \exp\left[\frac{-A}{X_e^B}\right] \dots\dots\dots (3)$$

**Donde:**

**A y B:** constantes de ajuste que dependen de la temperatura y naturaleza del producto.

**X<sub>e</sub>:** humedad de equilibrio.

**a<sub>w</sub>:** Actividad de agua.

### 2.5.4. Modelo de Oswin

Se utiliza para analizar las isotermas de adsorción de diferentes alimentos a actividades de agua comprendidas entre 0.0 hasta 1.0, presentan curvas en forma sigmoidea. Las constantes A y B presentan una correcta relación con la temperatura para las isotermas.

$$X_e = A \left[ \frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B \dots\dots\dots (4)$$

**Donde:**

**A y B:** constantes de ajuste que dependen de la temperatura y naturaleza del producto.

**X<sub>e</sub>:** humedad de equilibrio.

**a<sub>w</sub>:** Actividad de agua.

### 2.5.5. Modelo de Henderson

Este modelo es muy usual en la literatura alimentaria porque describe adecuadamente su comportamiento en diversas actividades de agua (0,1-0,7), como cereales y frutas.

$$a_w = 1 - \exp(-k \cdot X_e^n) \dots\dots\dots (5)$$

**Donde:**

**k y n:** constantes del modelo para un determinado alimento.

**Xe:** humedad de equilibrio.

**aw:** Actividad de agua.

### 2.5.6. Modelo de Chung-Pfost

Este modelo permite estimar los valores de humedad de equilibrio grano-cereal en el rango de humedad relativa 20-90% con precisión, para temperaturas constantes.

$$a_w = e^{\left(\frac{A}{RT}\right) * e^{(-B * X_e)}} \dots \dots \dots (6)$$

**Donde:**

**A y B:** constantes de ajuste que dependen de la temperatura y naturaleza del producto.

**Xe:** humedad de equilibrio.

**e:** número de Euler

**aw:** Actividad de agua.

**R:** constante universal de los gases.

**T:** temperatura (°K).

### 2.6. “qst” Calor isostérico de adsorción

(Vega Gálvez, Lara Aravena y Lemus Mondaca, 2006) indican que **qst** es una propiedad termodinámica de mucha importancia en el proceso de adsorción de los alimentos. (Goneli et al., 2016), indican que en el proceso de adsorción **qst** representa la energía necesaria para unir las moléculas de agua (humedad) y la topografía del alimento.

Por tanto, el “**qst**” (calor isostérico neto de adsorción) se obtiene mediante la diferencia del “**Qst**” (calor total de adsorción) menos el “**λ**” (calor de vaporización del agua pura) a una temperatura constante. Una de las formas más usuales para determinar “**qst**” está dada por la ecuación de Clausius-Clapeyron (Telis-Romero et al., 2005).

$$\frac{\partial \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \Big|_X = \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \Big|_X = -\frac{Q_{st}-\lambda}{R} = -\frac{q_{st}}{R} \dots \dots \dots (7)$$

**Dónde:**

**Q<sub>st</sub>** = Calor isostérico total de adsorción en KJ/mol

**q<sub>st</sub>** = Calor isostérico neto de adsorción en KJ/mol

**λ** = Calor de evaporización del agua pura en KJ/mol

**R** = Constante universal de los gases con valor de 8.314 KJ/ (Kmol °K)

Al integrar la ecuación y suponiendo que el q<sub>st</sub> es independiente del ambiente, tenemos:

$$\ln \frac{a_{w_2}}{a_{w_1}} \Big|_X = -\frac{q_{st}}{R} * \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] \dots \dots \dots (8)$$

**Dónde:**

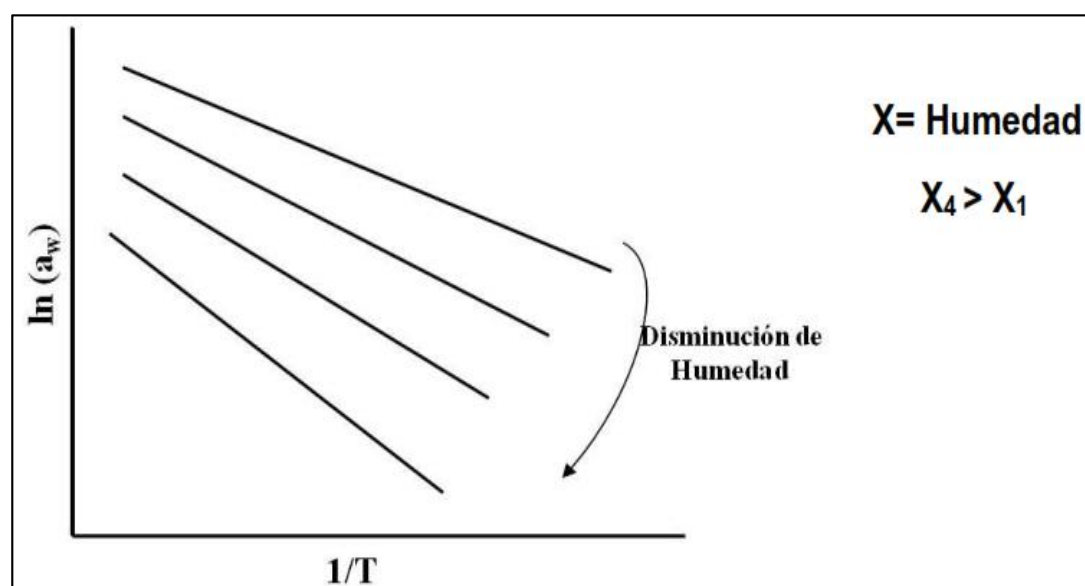
**aw1 y aw2:** actividad de agua 1 y actividad de agua 2.

**T1 y T2:** temperatura 1 y temperatura 2 en grados kelvin (°K)

**q<sub>st</sub>** = Calor isostérico neto de sorción (KJ/mol).

**R** = Constante universal de los gases, 8.314 KJ/ (Kmol °K)

Para evaluar y llegar al valor (q<sub>st</sub>), la isoterma de adsorción debe evaluarse a diferentes temperaturas y representarse como logaritmo natural de la actividad de agua versus el inverso de las temperaturas a distintas “HR”, obteniéndose así las rectas -q<sub>st</sub> / R, (Choque Q., Cáceres H. y Solano R., 2009).



*Figura 8.* Gráfico del inverso de las temperaturas versus el logaritmo natural de aw relacionada con la humedad.

Fuente: (Barbosa Cánovas, 2000).

(Tsami *et al.*, 2007) indican que el cálculo del calor isostérico de adsorción mediante la humedad de equilibrio, es de mucha importancia para que el alimento adquiera humedad, entendiéndose como la cantidad de calor necesario para la ganancia de agua en los alimentos. Se determina mediante el calor isostérico de adsorción de la primera molécula de agua multiplicado con la exponencial de la humedad de equilibrio en base a la humedad inicial del alimento en gramos de agua sobre gramos de masa seca.

$$q_{st} = q_0 \exp\left(\frac{-X_e}{X_0}\right) \dots \dots \dots (9)$$

**Dónde:**

$q_0$  = Calor isostérico de adsorción de la primera molécula de H<sub>2</sub>O en kJ/mol

$X_e$  = Humedad de equilibrio en gr H<sub>2</sub>O/gr masa seca

$X_0$  = humedad inicial en gr H<sub>2</sub>O/gr masa seca

## 2.7. “Ea” Energía de activación

La energía de activación es la energía mínima que necesita un sistema antes de poder iniciar un determinado proceso. A temperatura, la energía de activación viene determinada por la siguiente ecuación:

$$\ln(D) = \ln(D_0) - \left(\frac{E_a}{RT}\right) \dots \dots \dots (10)$$

**Donde:**

$D$ : constante estudiada.

$D_0$ : parámetro de Arrhenius.

$E_a$ : energía de activación en kJ/ k mol

$R$ : constante universal de los gases.

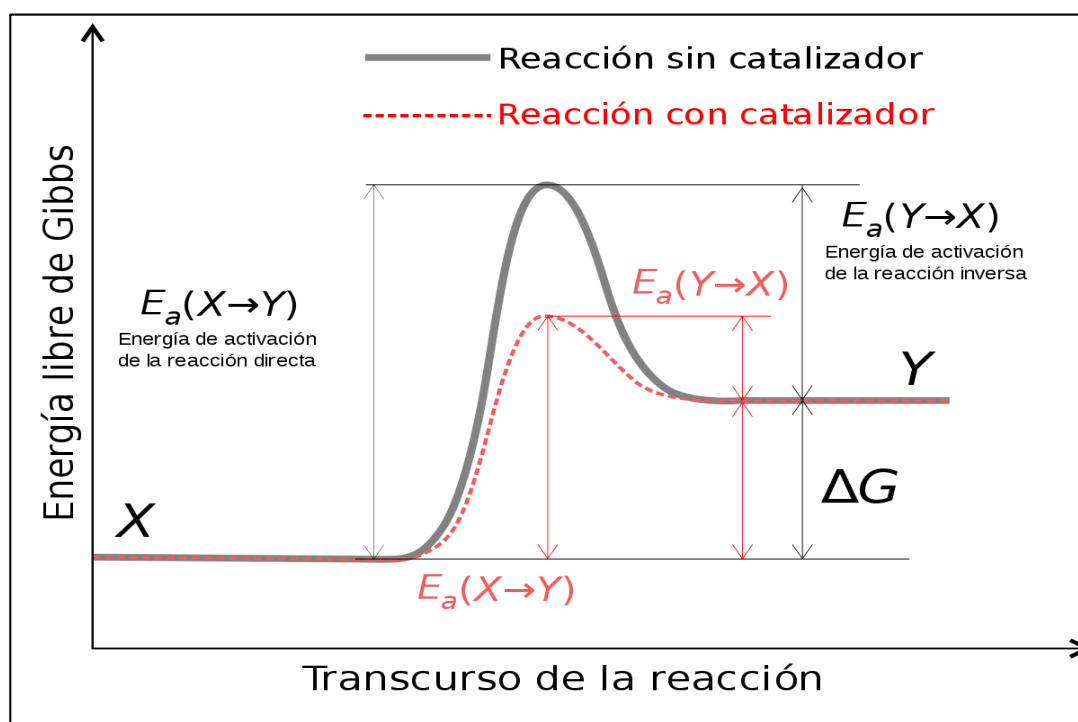
$^{\circ}T$ : temperatura absoluta ( $^{\circ}K$ ).

Energía necesaria para que el adsorbato migre de la monocapa. El paso de reactivos a productos, el cual al inicio posee una determinada energía mientras sus reactivos van reaccionando para formar un complejo activo y mantenerse en un estado de transición, en el que se aprecia como los reactivos se debilitan para formar los productos. La energía necesaria para alcanzar el complejo activo se denomina energía de activación (**Carmona Carmona, 2018**).

El valor de la energía de activación se puede obtener haciendo uso de la ecuación de Arrhenius, ya que, esta demuestra como la velocidad de reacción en un sistema aumenta al incrementar su temperatura (**Carmona Carmona, 2018**).

Los lugares activos de la topografía de la superficie del alimento están divididos por obstáculos, y cada sitio es un punto de adsorción, mostrando la profundidad más pequeña. Para el que es absorbido radique desde esta posición (monocapa), se necesita  $E_a$ .

A la energía de activación también se le conoce como la energía necesaria para contorsionar las moléculas de reactivo de modo que puedan modificarse los enlaces (**Lozano et al., 2016**).



*Figura 9.* Cambios de energía en el paso de transformación de reactivos a producto.

Fuente: (Lozano et al., 2016).

La figura 9 muestra el paso de reactivos a productos, el cual al inicio posee una determinada energía mientras sus reactivos van reaccionando para formar un complejo activo y mantenerse en un estado de transición, en el que se aprecia como los reactivos se debilitan para formar productos. La energía necesaria para alcanzar el complejo activo se denomina energía de activación.

## 2.8. Almacenamiento

Un buen almacenamiento debe evitar la humedad, el oxígeno en el aire y la luz, que afectarán al pigmento y catalizarán la oxidación. **(Casp Vanaclocha y Abril Requena, 2003)** citado por **(Choque Q., Cáceres H. y Solano R., 2009)**.

Los alimentos deteriorados se ven afectados por factores ambientales, como las altas y bajas temperaturas, y otros factores provocarán el deterioro de los alimentos dentro de un cierto período de tiempo. Cuanto más tiempo esté expuesto el alimento a factores degradantes, mayor será el efecto destructivo. **(Casp Vanaclocha y Abril Requena, 2003)** citado por **(Choque Q., Cáceres H. y Solano R., 2009)**.

Los principales factores de almacenamiento que afectan la preservación de un alimento en particular son; temperatura, humedad y composición atmosférica. **(Mosquera Pinto, de la Vega y Cañarejo, 2016)**.

### 2.8.1. Temperatura (°T)

Cuando no hay control del calor y el frío en los alimentos pueden echarse a perder, esto a pesar de no considerar a los microorganismos, es por ello que la temperatura juega un papel muy importante en la conservación de los alimentos **(Choque Q., Cáceres H. y Solano R., 2009)**.

Dado que la velocidad de la reacción bioquímica es función de la temperatura, las temperaturas de almacenamiento más bajas ralentizan el deterioro de los alimentos debido al deterioro bioquímico y suprimen el crecimiento de mohos y bacterias **(Brennan, 2008; Choque Q., Cáceres H. y Solano R., 2009)**.

Según **(Cheftel et al., 2000)** Hay especies bacterianas que crecen solo dentro de ciertos límites de temperatura y tienen la temperatura óptima para su crecimiento. Es por eso que la temperatura de almacenamiento genera un gran efecto sobre el deterioro de los alimentos.

En general, teniendo en cuenta la temperatura a la que crecen los microorganismos, se clasifican en 3 partes los que afectan la calidad de un alimento.

**Tabla 4.** *Temperaturas óptimas para el crecimiento microbiano*

| Microorganismos | Temperatura de desarrollo °C |             |             |
|-----------------|------------------------------|-------------|-------------|
|                 | mínima                       | optima      | máxima      |
| psicrófilos     | -15                          | + 10        | + 20 aprox. |
| mesófilos       | +5 a +10                     | + 30 a + 40 | + 50 aprox. |
| termófilos      | + 40                         | +50 a + 55  | + 65        |

Fuente: (Cheftel et al., 2000).

Cada grupo incluye especies con propiedades psicrófilo, mesófilo y termófilo estricto. Además, el límite de temperatura es más o menos amplio. Algunos estreptococos ocurren entre 0 ° C y 30 ° C.

Estos confirman que pueden ocurrir cambios microbianos dependiendo de la temperatura para su preservación.

### 2.8.2. “HR” Humedad relativa del ambiente

Cuando la HR de almacenamiento es superior a  $X_e$  del alimento, el contenido de humedad del alimento aumenta y viceversa. La absorción de agua durante el almacenamiento es sensible al crecimiento de microorganismos y la deshidratación conduce no solo a pérdidas monetarias sino también a problemas más específicos como grietas en las cáscaras de cereales, frutas y verduras (Brennan, 2008).

La humedad ambiental está relacionada con el crecimiento microbiano, especialmente en las superficies de los alimentos. Sin embargo, hay que recordar que varía con la temperatura, y por otro lado tiende a establecer un equilibrio entre la HRE y la actividad hídrica del producto, siendo un factor dependiente de otros. (Cheftel et al., 2000).

Idealmente, la humedad de almacenamiento debería ser igual a la humedad de equilibrio de los alimentos. (Brennan, 2008).

### 2.8.3. Composición de la atmosfera

Además del vapor de agua, intervienen otros gases de la atmósfera, como el oxígeno, nitrógeno y anhídrido carbónico, los cuales afectan a la flora bacteriana susceptible de alterar un alimento; la presión parcial del oxígeno

influye sobre el potencial de oxi-reducción que tiene un alimento; no obstante, el que más participa sobre la flora de variación es el potencial del alimento, pues, generalmente, resulta poco perjudicado por las variaciones moderadas de la presión de oxígeno **(Cheftel *et al.*, 2000)**.



## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. Tipo de estudio

La presente investigación, “Evaluación de las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña (*Bertholletia Excelsa*, H.B.K.)” es un “estudio correlacional”, esto porque su objetivo principal radica en relacionar variables y conocer que tan asociados están dos o más variables en una determinada muestra.

### 3.2. Diseño del estudio

El diseño de este estudio fue de “**diseño experimental**”. Por lo tanto, a través de la parte experimental se intenta conocer las causas del porque ocurre un determinado fenómeno, para ello es necesario someter las variables a estudiar a condiciones manejables y medibles.

### 3.3. Materiales y equipos

#### 3.3.1. Materia prima

La materia prima utilizada en esta investigación fue la castaña de tercera (broken), la cual se obtuvo de la Asociación “ASCART” del centro poblado del triunfo, distrito las Piedras, provincia de Tambopata, región de MDD.

#### 3.3.2. Reactantes (sales)

- Cloruro Lítico (LiCl), Scharlab S.L.
- Acetato Potásico ( $KC_2H_3O_2$ ), ciencia & técnica García-Giménez S.R.L.
- Cloruro Magnésico ( $MgCl_2$ ), 64271 Darmstadt
- Carbonato Potásico ( $K_2CO_3$ ), J.T. BAKER
- Nitrato de Magnesio ( $MgNO_3$ ), ciencia & técnica García-Giménez S.R.L.
- Nitrato de Sodio ( $NaNO_2$ ), ciencia & técnica García-Giménez S.R.L.
- Cloruro de Sodio (NaCl), ciencia & técnica García-Giménez S.R.L.
- Cloruro de Potasio (KCl), ciencia & técnica García-Giménez S.R.L.
- Cloruro de Bario ( $BaCl_2$ ), 64271 Darmstadt

#### 3.3.3. Equipos

- Estufa de laboratorio, marca TOMOS, modelo ODHG-9053<sup>a</sup>, intervalo de medida de 0 a 200°C, error  $\pm 1^\circ C$ .
- Incubadora de laboratorio, marca MEMMERT, modelo INB-400, intervalo de medida de 0 a 70°C.

- Balanza gramera, marca GEHAK, intervalo de medida de 0.2 a 6100 gramos, error  $\pm 0.1$  gr.
- Balanza analítica de laboratorio, marca OHAUS ADVENTURER, modelo AR 2140, intervalo de medida de 0 mg a 210 gr, error  $\pm 0.1$  mg.

#### **3.3.4. Materiales**

- Frascos de vidrio con tapa hermética.
- Probeta de 100ml, error  $\pm 1$  ml.
- Pesa filtros de una capacidad de 15 ml.
- Vaso descartable de plástico (Taper) de 500 ml
- Termómetro de mercurio (intervalo: 0-100°C).
- Marcador permanente, marca Faber Castell.
- Lentes de seguridad, marca KAMASA.
- Jeringa descartable de 5 ml.
- Bandejas de malla metálica.
- Espátula de laboratorio.
- K Pinza de laboratorio.
- Campana desecadora
- Guantes quirúrgicos
- Mascarillas
- Bolsas de polietileno

#### **3.3.5. Limpiadores y desinfectantes químicos**

- Hipoclorito de sodio al 5.5%.
- Agua destilada.
- Alcohol etílico 96°
- Formol 40%

### **3.4. Métodos y técnicas**

#### **3.4.1. Lugar de ejecución**

Este estudio se realizó en el laboratorio de procesos agroindustriales y en el laboratorio de Química de la UNAMAD ubicado en la Av. Jorge Chávez N°1160, ciudad de Puerto Maldonado.

#### **3.4.2. Obtención de harina de torta de castaña**

Para la obtención de las muestras de la harina de torta de castaña se detalla en el diagrama utilizado en la Figura 10, luego fue utilizado en la evaluación

experimental de las isothermas de adsorción.

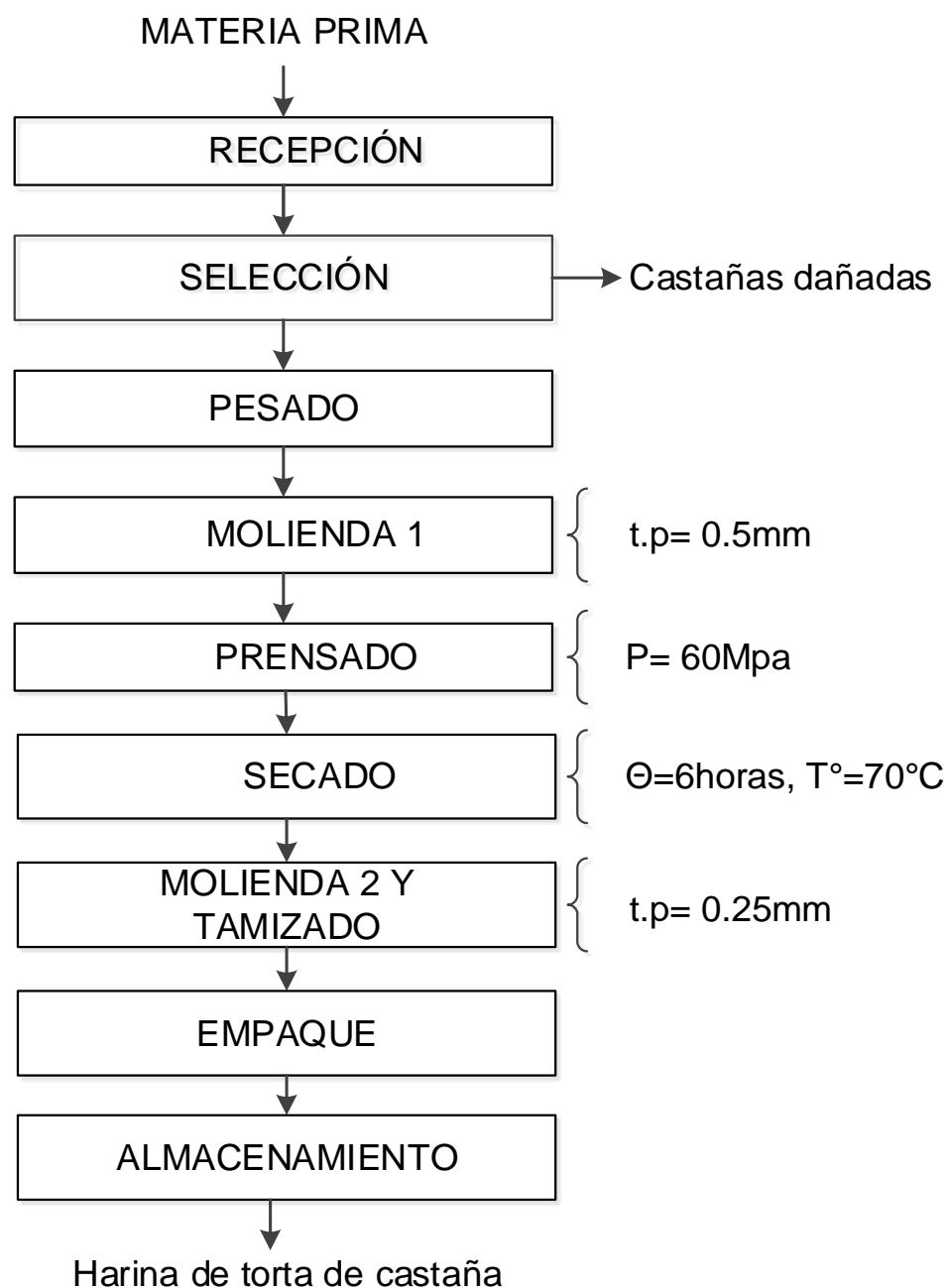


Figura 10. Flujograma para obtener la harina de torta de Castaña

**Materia Prima.** La castaña de tercera (broken) se utilizó para obtener harina de torta de castaña, que también fue utilizada para la evaluación de isothermas de adsorción.

**Recepción** En esta etapa se realizó la recepción de la castaña de tercera (broken), se registró datos como: Hora: 07:00am; Fecha: 13/09/2019,

Cantidad: 10kg; lugar de procedencia del producto: Asociación de Castañeros de la Reserva Tambopata los Pioneros-ASCART

**Selección.** Esta operación se realizó colocando el producto en una meza, se procedió a verificar que el producto esté libre de contaminación física, con el fin de que la muestra tenga las óptimas condiciones de procesamiento. Para ello se utilizó guantes.

**Pesado.** Esta operación se realizó utilizando una Balanza de precisión, marca GEHAK

**Molienda 1.** Se utilizó un molino industrial de carnes, hasta obtener una masa con el objetivo de facilitar el prensado.

**Prensado.** En esta operación se utilizó la prensa hidráulica de la planta piloto de frutas a fin de extraer el aceite de la castaña, una vez separado el aceite quedo una especie de torta, se le denomina así por ser derivado en la extracción de aceite.

**Molienda y Tamizado.** Se utilizó un molino industrial de harinas, por el cual pasó el producto seco para ser finamente molido, se utilizó una malla de 0.5mm, luego se usó una malla de 0.25 mm a fin de tamizar y obtener un producto con un tamaño de partícula de  $\leq 0.25$ mm.

**Secado.** Este proceso se realizó con la finalidad de reducir los niveles de humedad de la harina. Se procedió a secar en la estufa a una temperatura de 65°C durante 12 horas, la humedad final del producto fue de 3.52%.

**Empaque y sellado.** Cuando la harina esta lista, se procedió a envasar en unas bolsas de polipropileno con un peso de 100 gr cada bolsa, luego se procedió a sellar para evitar que la humedad ingrese al producto y así evitar la contaminación del ambiente.

**Almacenamiento.** Se almaceno a temperatura ambiente, el ambiente fue fresco, seco y oscuro.

### **3.5. Acondicionamiento de la harina de torta de castaña**

Las muestras fueron acondicionadas con distintas soluciones salinas, luego en una incubadora a distintas temperaturas hasta lograr un peso constante.

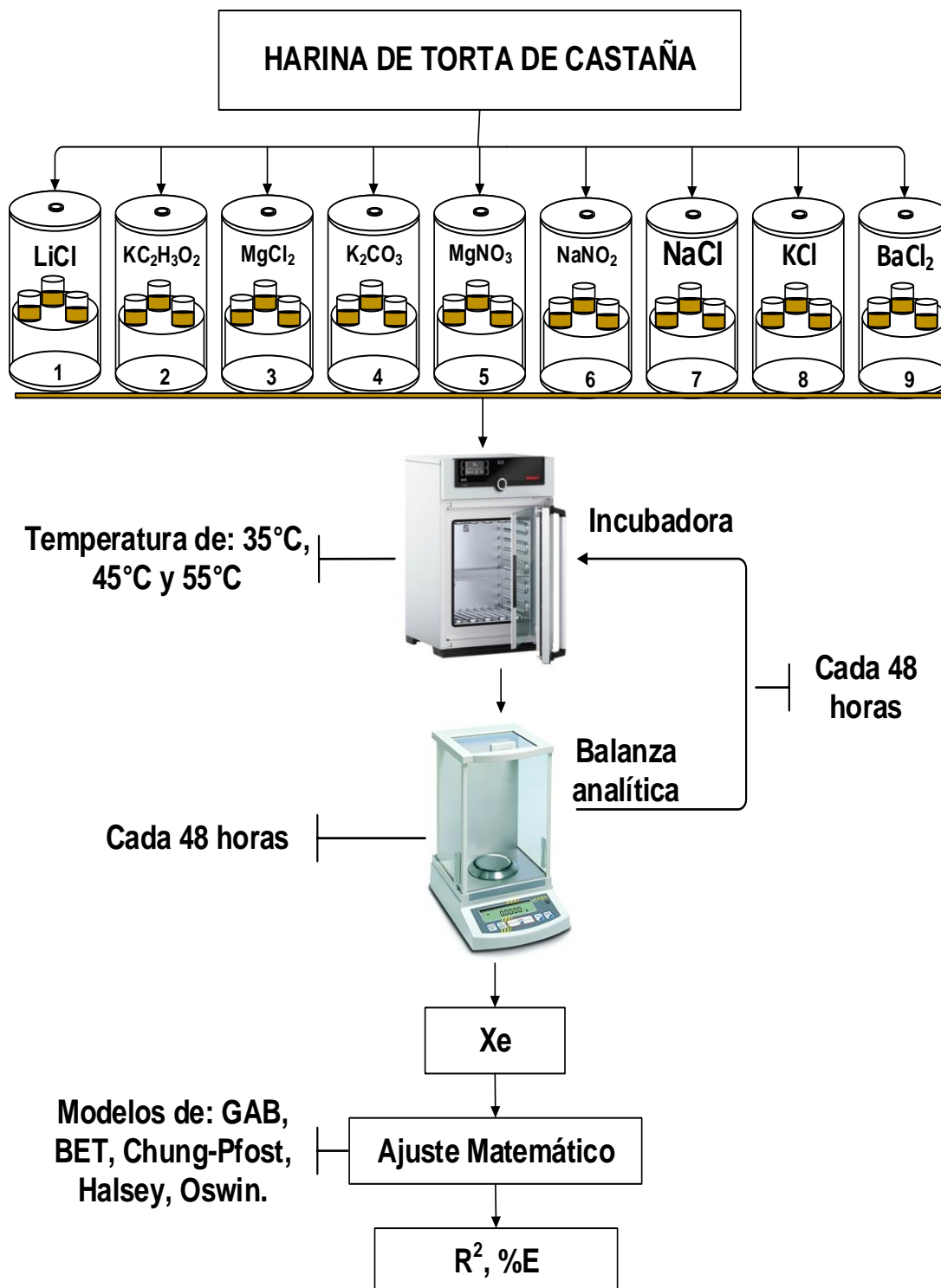


Figura 11. Diagrama de equipos para la evaluación de las isothermas de adsorción de la harina de torta de castaña.

Con la ayuda del diagrama de equipos se realizó un flujograma para el proceso de la evaluación de las isothermas de adsorción de harina de torta de castaña.

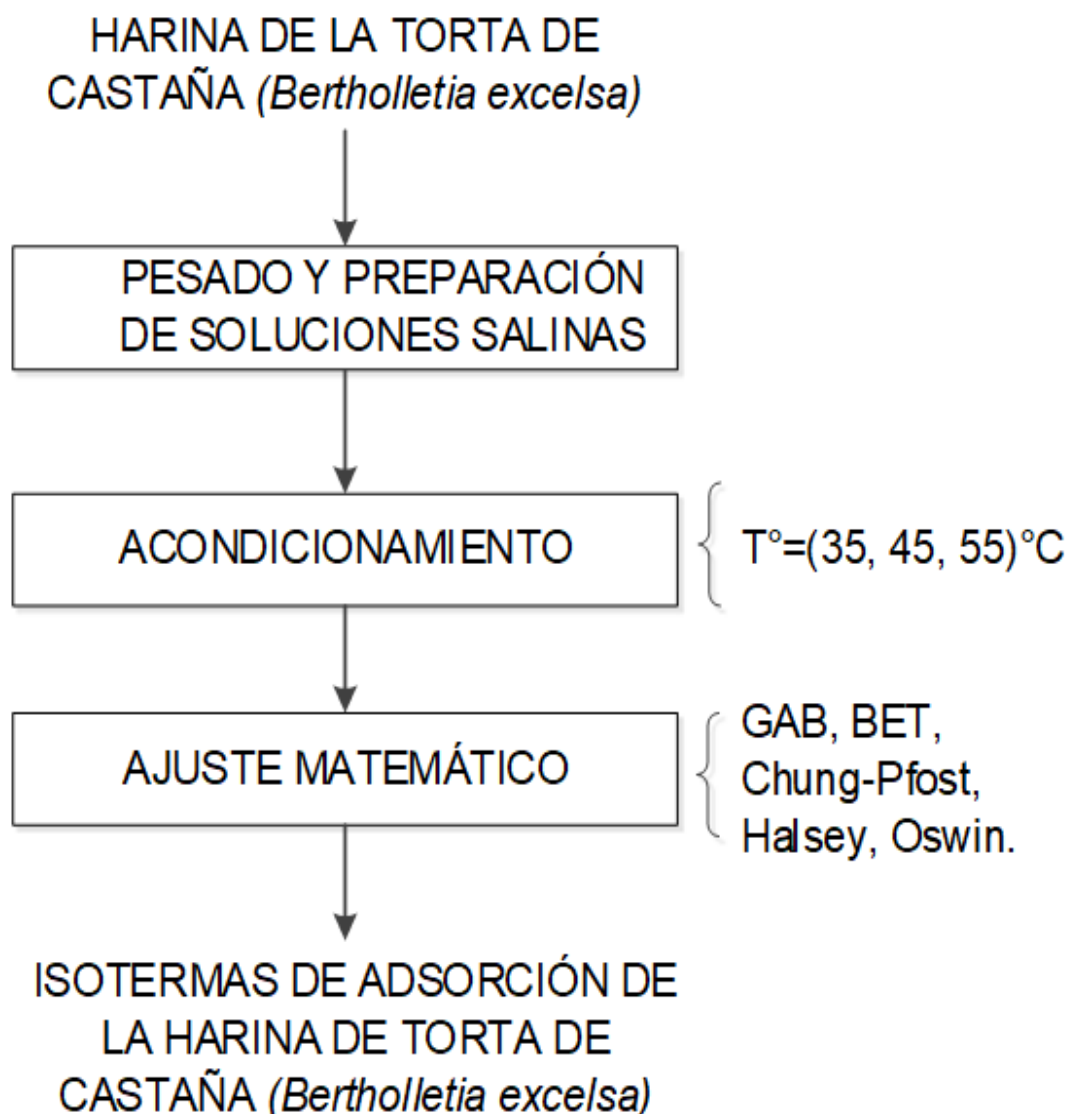


Figura 12: Flujograma para la evaluación de las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña.

Posteriormente se realizó la descripción de las operaciones del Flujograma: **Pesado y preparación de soluciones salinas.** Se utilizó la balanza analítica para pesar la muestra de 1 gr en cada pesafiltro, esta operación se realizó por triplicado para cada solución salina. Así mismo se procedió a pesar las sales, para la preparación de cada solución salina se utilizó la siguiente tabla:

**Tabla 5.** Cantidad recomendada de sal y agua para preparar solución salina saturada.

| N° | Sales                | Símbolo  | Cantidad a preparar |           |
|----|----------------------|--|---------------------|-----------|
|    |                      |  | Sal (gr)            | Agua (ml) |
| 1  | Cloruro de Litio     | (LiCl)   | 150                 | 85        |
| 2  | Acetato de Potasio   | (KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) | 200                 | 65        |
| 3  | Cloruro de Magnesio  | (MgCl <sub>2</sub> )                             | 200                 | 25        |
| 4  | Carbonato de Potasio | (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )                | 200                 | 90        |
| 5  | Nitrato de Magnesio  | (MgNO <sub>3</sub> )                             | 200                 | 50        |
| 6  | Nitrato de Sodio     | (NaNO <sub>2</sub> )                             | 200                 | 30        |
| 7  | Cloruro de Sodio     | (NaCl)   | 200                 | 60        |
| 8  | Cloruro de Potasio   | (KCl)  | 200                 | 80        |
| 9  | Cloruro de bario     | (BaCl <sub>2</sub> )                             | 200                 | 60        |

Fuente: (Wolf, Spiess y Jung, 1985).

**Acondicionamiento.** Para el acondicionamiento de las muestras se siguió una secuencia el cual se detalla a continuación:

- Se colocó 3 pesafiltros con muestra de harina de torta de castaña, en cada frasco.
- Se colocó las muestras dentro de los frascos, en cada frasco se puso un soporte de plástico, con la finalidad de que la muestra no tenga contacto directo con la solución salina.
- Se tapó los frascos herméticos cuidadosamente.
- Se sometió las muestras en la incubadora a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C respectivamente.
- El registro de pesos se obtuvo cada 48 horas, esto se realizó utilizando la balanza analítica hasta lograr el equilibrio en el pesado, a esto se le determinara la humedad al que lo llamamos humedad de equilibrio.

**Ajuste matemático.** Luego de obtener las humedades de equilibrio de las muestras se realizó al ajuste matemático aplicando los modelos matemáticos en el **software STATISTICA 2020 versión 10.0**, luego se procedió a obtener las humedades relativas, evaluar las humedades de equilibrio y evaluar las humedades de monocapa.

#### a) Obtención de las humedades relativas

Para obtener las humedades relativas se utilizó las ecuaciones ampliamente utilizadas en investigaciones, determinadas por **(Labuza, Kaanane y Chen, 1985)**, el cual se muestra a continuación.

**Tabla 6.** Ecuaciones de las sales utilizadas para la obtención de  $a_w$  a las temperaturas de estudio

| N° | NOMENCLATURA DE SALES | FÓRMULA DE SAL                                   | ECUACION DE REGRESION(T: °K)          | R <sup>2</sup> |
|----|-----------------------|--|---------------------------------------|----------------|
| 1  | Cloruro de Litio      | (LiCl)   | $\ln a_w = (500.95 \cdot 1/T) - 3.85$ | 0.976          |
| 2  | Acetato de Potasio    | (KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) | $\ln a_w = (861.39 \cdot 1/T) - 4.33$ | 0.965          |
| 3  | Cloruro de Magnesio   | (MgCl <sub>2</sub> )                             | $\ln a_w = (303.35 \cdot 1/T) - 2.13$ | 0.995          |
| 4  | Carbonato de Potasio  | (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )                | $\ln a_w = (145.00 \cdot 1/T) - 1.30$ | 0.967          |
| 5  | Nitrato de Magnesio   | (MgNO <sub>3</sub> )                             | $\ln a_w = (356.60 \cdot 1/T) - 1.82$ | 0.987          |
| 6  | Nitrato de Sodio      | (NaNO <sub>2</sub> )                             | $\ln a_w = (435.96 \cdot 1/T) - 1.88$ | 0.974          |
| 7  | Cloruro de Sodio      | (NaCl)   | $\ln a_w = (228.92 \cdot 1/T) - 1.04$ | 0.961          |
| 8  | Cloruro de Potasio    | (KCl)  | $\ln a_w = (367.58 \cdot 1/T) - 1.39$ | 0.967          |
| 9  | Cloruro de bario      | (BaCl <sub>2</sub> )                             | $\ln a_w = (58.94 \cdot 1/T) - 0.31$  | 0.965          |

Fuente: (Labuza, Kaanane y Chen, 1985).

Seguidamente se procedió a calcular las humedades relativas utilizando las ecuaciones antes mencionadas, las humedades relativas varían desde 9.79% hasta 88.80% el cual se muestra a continuación:

**Tabla 7.** Humedades relativas (%) de cada solución salina en base a las temperaturas estudiadas.

| N° | NOMENCLATURA DE SALES | FÓRMULA DE SAL                                   | HUMEDAD RELATIVA (%) |       |       |
|----|-----------------------|--|----------------------|-------|-------|
|    |                       |  | 35°C                 | 45°C  | 55°C  |
| 1  | Cloruro de Litio      | (LiCl)   | 10.81                | 10.28 | 9.79  |
| 2  | Acetato de Potasio    | (KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) | 21.55                | 19.74 | 18.18 |
| 3  | Cloruro de Magnesio   | (MgCl <sub>2</sub> )                             | 31.80                | 30.84 | 29.95 |
| 4  | Carbonato de Potasio  | (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )                | 43.63                | 42.99 | 42.40 |
| 5  | Nitrato de Magnesio   | (MgNO <sub>3</sub> )                             | 51.54                | 49.70 | 48.03 |
| 6  | Nitrato de Sodio      | (NaNO <sub>2</sub> )                             | 62.80                | 60.07 | 57.61 |
| 7  | Cloruro de Sodio      | (NaCl)   | 74.30                | 72.58 | 71.01 |
| 8  | Cloruro de Potasio    | (KCl)  | 82.11                | 79.09 | 76.35 |
| 9  | Cloruro de bario      | (BaCl <sub>2</sub> )                             | 88.80                | 88.27 | 87.78 |

Fuente: (Labuza, Kaanane y Chen, 1985).

### b) Obtención de “Xe” humedad de equilibrio

La “Xe” se determinó por diferencia de masas, primero se realiza el pesado de la muestra húmeda y luego la muestra seca, seguidamente se aplica la siguiente ecuación (Gabas *et al.*, 2009).

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \dots \dots \dots (11)$$



**Donde:**

**Xe:** Contenido de humedad en equilibrio (gr H<sub>2</sub>O/gr masa seca)

**Meq:** cantidad de muestra en equilibrio (gr).

**Ms:** cantidad de muestra seca (gr).

La masa de la harina de torta de castaña seca fue obtenida por el método de la estufa a 105°C durante 24 horas, los pesa filtros con la masa de muestra en equilibrio fueron sacados de la estufa y enfriados a temperatura ambiente en una campana desecadora durante media hora. Las obtenciones de los valores de Xe fueron realizadas para cada pesafiltro, luego se obtuvo el promedio de los tres pesafiltros para cada solución salina saturada.

**c) Obtención de “Xm” humedad de monocapa**

La humedad de monocapa se obtuvo a partir de las ecuaciones del modelo matemático de Gab a partir de los resultados obtenidos a 35°C, 45°C y 55°, respectivamente, para ello utilizamos el programa **STATISTICA 2020 versión 10.0**.

**3.5.1. Obtención de “qst” calor isostérico de adsorción**

Una vez encontrado la isoterma de adsorción y ajustado al modelo GAB, se analizó los parámetros Xm, C y K, y luego para determinar el calor isostérico se utilizó la fórmula de Clausius-Clapeyron (Ecuación 11).

Para ello se calculó el promedio de “Xe” (humedad de equilibrio) de las tres temperaturas estudiadas, sus valores de la humedad de equilibrio varían desde 2.99% hasta 10.57%. El valor de qst tiene relación con las rectas graficadas de ln de aw versus el inverso de las temperaturas y luego se multiplica por “R” constante universal de los gases (8,314 KJ/ Kmol °K). finalmente los datos de qst y las humedades de equilibrio se ajustó a la ecuación exponencial de **(Tsami et al., 2007)** (Ecuación 11), para ello se utilizó el programa STATISTICA 2020 versión 10.0 y así también se pudo calcular los parámetros q0 y X0 para la harina de torta de castaña.

**3.5.2. Obtención de “Ea” energía de activación**

Para la obtención de la energía de activación se utilizó la fórmula de Arrhenius (Ecuación 10), seguidamente se trazó las curvas de logaritmo natural de la monocapa Xm, la constante C de GAB y el parámetro K de GAB, todos estos parámetros fueron graficados con el inverso de las temperaturas en grados

kelvin °K, obteniéndose así la pendiente  $-E_a/R$ , finalmente se determinó el coeficiente de determinación  $R^2$  para ver si presentan buena relación.

Para la aplicación de la ecuación de Arrhenius se reemplazó la variable  $D$  por los parámetros del modelo GAB, como resultado el valor de la energía de activación tomó valores distintos para cada parámetro

### 3.6. Tratamiento de datos

#### 3.6.1. Técnica de determinación de datos

Los puntos experimentales de isothermas de adsorción obtenidos en el presente trabajo fueron ajustados con los modelos matemáticos (GAB, BET, Halsey, Oswin, Henderson y Chung Pfof).

Asimismo, para el análisis de regresión no lineal se utilizó el software STATISTICA 2020 versión 10.0 y así evaluar las constantes del modelo matemático, con 500 interacciones y 0,0001 criterios de convergencia. Los ajustes se realizaron al nivel de significancia del 5%.

Los ajustes de los modelos matemáticos fue evaluada mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual es uno de los primeros criterios para seleccionar la ecuación que describe mejor los datos experimentales; también se utilizó “%E” (porcentaje de error medio relativo), ambos parámetros estadísticos utilizados mayormente en el estudio de isothermas de adsorción de alimentos (Carvalho Lago y Zapata Noreña, 2015).

$$\%E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \dots\dots\dots (12)$$

**Donde:**

**%E:** error relativo medio en porcentaje

**X<sub>ei</sub>:** Humedad del equilibrio experimental (gr H<sub>2</sub>O / gr ms).

**X<sub>ci</sub>:** humedades de equilibrio ajustado por modelo (gr H<sub>2</sub>O / gr ms.).

**n:** cantidad de observaciones.

## CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 4.1. Análisis fisicoquímico de la harina de torta de castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K.)

Los resultados del análisis fisicoquímico fueron realizados por la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC y se realizó por triplicado tal como se ve en la siguiente tabla:

**Tabla 8:** *análisis fisicoquímico del producto estudiado*

| ANALISIS                 | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 3 | PROMEDIO      |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Humedad %                | 6.46      | 6.58      | 6.65      | <b>6.56</b>   |
| Materia seca %           | 93.54     | 93.42     | 93.35     | <b>93.44</b>  |
| Proteína %               | 36.32     | 37.28     | 38.21     | <b>37.27</b>  |
| Grasa %                  | 6.54      | 6.86      | 6.72      | <b>6.71</b>   |
| Ceniza %                 | 11.26     | 11.32     | 11.27     | <b>11.28</b>  |
| Fibra %                  | 1.31      | 1.24      | 1.38      | <b>1.31</b>   |
| Carbohidratos %          | 33.14     | 32.12     | 32.25     | <b>32.50</b>  |
| Energía Kcal/100         | 405.16    | 406.24    | 408.64    | <b>406.68</b> |
| Acidez % (ácido cítrico) | 0.1       | 0.13      | 0.12      | <b>0.12</b>   |
| Ph                       | 6.7       | 6.9       | 6.8       | <b>6.80</b>   |

Fuente: (Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC, 2020).

En la tabla podemos apreciar la composición de la harina de torta de castaña, la proteína es característico de este producto, ya que ha dado un efecto productivo positivo al crecimiento de pacos juveniles (**Chirinos, 2015**). (**Chirinos, 2015**) También obtuvo resultados similares con una humedad de 13.9%, proteína 35%, Carbohidratos 31.8%, Grasa 6.9%, Ceniza 11.4%, Fibra 1.0%, pH 6.7%. para su producto torta de castaña.

### 4.2. Humedad de equilibrio

Las humedades de equilibrio y humedad inicial de la muestra fue obtenido por el método propuesto por la **Asociación de Químicos Analíticos Oficiales-AOAC** aplicado por (**Morales et al., 2019**) metodología para humedad (925.10). La humedad inicial de la muestra ha sido de 0.656 g agua/g m.s. ó

6.56%, no obstante, la siguiente tabla muestra datos experimentales para obtener el contenido de “**Xe**” (humedad de equilibrio) en funcionalidad de la “**aw**” (actividad del agua) a 35°C, 45°C y 55°C, el tiempo empleado para lograr “**Xe**” (humedad de equilibrio) ha sido de 30, 25 y 20 días, respectivamente.

**Tabla 9.** *humedades de equilibrio (Xe) de harina de torta de castaña versus actividad del agua (aw).*

| N° | Soluciones salinas                                | Temperaturas (°C) |                             |           |                             |           |                             |
|----|---|-------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|
|    |   | 35                |                             | 45        |                             | 55        |                             |
|    |   | <b>aw</b>         | <b>Xe (b.s)<sup>a</sup></b> | <b>aw</b> | <b>Xe (b.s)<sup>a</sup></b> | <b>aw</b> | <b>Xe (b.s)<sup>a</sup></b> |
| 1  | <b>(LiCl)</b>                                     | 0.1081            | 0.0286                      | 0.1028    | 0.0305                      | 0.0979    | 0.0307                      |
| 2  | <b>(KC<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>)</b> | 0.2155            | 0.0483                      | 0.1974    | 0.0389                      | 0.1818    | 0.0386                      |
| 3  | <b>(MgCl<sub>2</sub>)</b>                         | 0.3180            | 0.0483                      | 0.3084    | 0.0429                      | 0.2995    | 0.0402                      |
| 4  | <b>(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)</b>              | 0.4363            | 0.0496                      | 0.4299    | 0.0445                      | 0.4240    | 0.0557                      |
| 5  | <b>(MgNO<sub>3</sub>)</b>                         | 0.5154            | 0.0623                      | 0.4970    | 0.0537                      | 0.4803    | 0.0605                      |
| 6  | <b>(NaNO<sub>2</sub>)</b>                         | 0.6280            | 0.0675                      | 0.6007    | 0.0652                      | 0.5761    | 0.0674                      |
| 7  | <b>(NaCl)</b>                                     | 0.7430            | 0.0692                      | 0.7258    | 0.0703                      | 0.7101    | 0.0683                      |
| 8  | <b>(KCl)</b>                                      | 0.8211            | 0.1211                      | 0.7909    | 0.0823                      | 0.7635    | 0.0730                      |
| 9  | <b>(BaCl<sub>2</sub>)</b>                         | 0.8880            | 0.1318                      | 0.8827    | 0.1058                      | 0.8778    | 0.0795                      |

b.s: base seca

a: El promedio de tres repeticiones.

En la tabla se puede apreciar que la humedad de equilibrio (Xe) incrementó de: 2.86% a 13.18% para 35°C; 3.05% a 10.58% para 45°C; y 3.07% a 7.95% para 55°C, “**Xe**” (humedad de equilibrio) y “**aw**” (actividad del agua) presentan relación positiva, y ocurre lo contrario en Xe y la temperatura presentando relación negativa, demostrando lo higroscópico de las muestras, es por ello que puede decirse que su comportamiento es similar a la mayor parte de los productos agrícolas (**Tsami et al., 2007; Bazardeh y Esmaili, 2014**).

Según (**Rizvi, 2005**), cuando la humedad de equilibrio disminuye y la temperatura aumenta durante el proceso de adsorción, se debe a que está relacionada con el cambio de energía del sistema, lo que indica que el

aumento de temperatura hace que las moléculas sean termodinámicamente inestables. En otras palabras, aumenta el grado de desorden de las moléculas de agua adsorbidas en la superficie sólida y alcanza un mayor nivel de energía, facilitando así la ruptura de los enlaces intermoleculares entre el agua y el sitio de adsorción, y disminuyendo la humedad del alimento. Conforme la temperatura va cambiando también el deslizamiento y la atracción de las moléculas también cambian, es por esto que la humedad adsorbida depende mucho de la humedad relativa y la temperatura.

### 4.3. Isotermas de Adsorción

Los datos obtenidos en la parte experimental sobre “ $X_e$ ” (humedad de equilibrio) y “ $a_w$ ” (actividad del agua), se representaron mediante curvas y para la obtención de parámetros de los modelos matemáticos (GAB, CHUNG PFOST, HALSEY, OSWIN, BET y HENDERSON) se empleó el **software STATISTICA 2020 versión 10.0**.

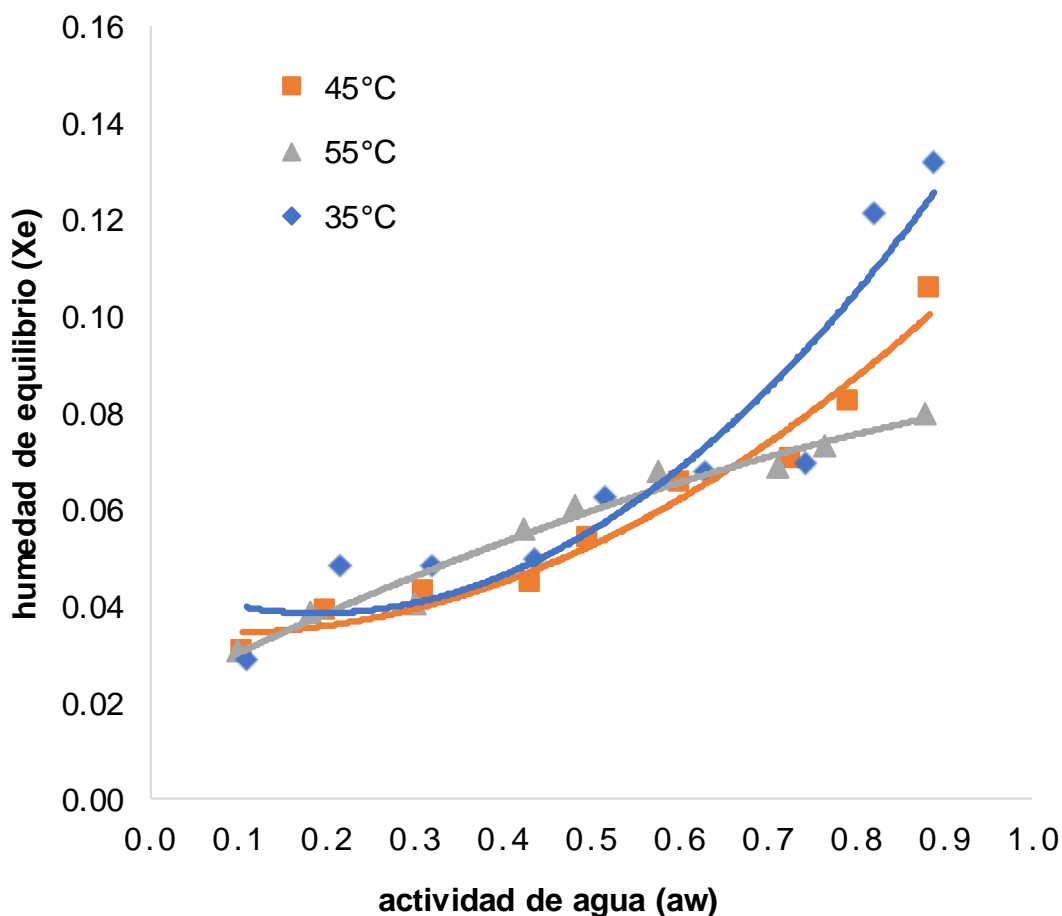


Figura 13. Isotermas de adsorción de harina de torta de castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) a 35°C, 45°C y 55°C.

Los modelos que muestran el mejor ajuste son: GAB y Oswin, los cuales se muestran en las Ecuaciones 1 y 4. También se puede decir que las curvas tienen un comportamiento Tipo II, y tienen la forma de una "curva s", según la Isoterma de Van der Waals a 35 °C, 45°C y 55°C de clasificación de temperatura, la interacción adsorbente-adsorbente es débil. Este comportamiento de esta isoterma es una característica típica de los alimentos con alto contenido proteico.

Las isotermas presentan curvas similares a una recta hasta el punto en donde la  $a_w$  es de 0.6, es ahí donde las curvas presentan entrecruzamientos y cambian su rumbo de forma exponencial. Esto indica que la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 6.67% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 60%, si en caso la humedad relativa del ambiente y del producto sea superior sea superior a lo indicado el producto podría ser afectado tanto en su calidad y microbiológicamente. Comportamientos similares fueron obtenidos por:

**(Sahu, Patel y Khokhar, 2021)** en el comportamiento de sorción y calor isostérico de productos extruidos enriquecidos con proteínas a base de maíz y mijo, la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 14% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 65%.

**(Ferreira y Pena, 2003)** para isotermas de harina de pijuayo (*Bactris gasipaes*), la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 5.3% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 50%.

**(Da-Silva Pena, Mendonça y Costa de Almeida, 2010)** en el comportamiento higroscópico del polvo de Asai (*Euterpe oleracea Mart.*), la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 7% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 60%.

**(Eluan da SILVA, Helena Meller da SILVA y da Silva PENA, 2008)** en el comportamiento higroscópico del Asai y Copoazú en polvo, la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 10% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 60%, así mismo indica que por encima de este nivel, absorberán el agua con una

velocidad creciente. Por tanto, se recomienda utilizar envases impermeables o envases con baja permeabilidad al vapor de agua, como los envases con películas metálicas.

**(Pulla Huillca, 2011)** en las isotermas de adsorción del ají ojito de pescado (*Capsicum annuum L.*) seco, la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 8.5% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 50%.

**(Gutierrez Balarezo, 2014)** en las isotermas de adsorción de harina de plátano (*Musa paradisiaca L.*), la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 13% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 50%.

**(Huaman Yuca, 2016)** en las isotermas de adsorción de harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 13% a 17% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 60%.

En las isotermas de adsorción de la Figura 13 la intersección de las curvas también se observa en las proximidades de la actividad del agua de 0.6, este comportamiento se aprecia para las temperaturas 35°C, 45°C y 55°C.

**(Huamán, 2016)** reportó entrecruzamientos para harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) en intervalos de actividad de agua de 0.4 a 0.6, a temperaturas de 30°C, 40°C y 50°C. **(Vega Gálvez, Lara Aravena y Lemus Mondaca, 2006)** indican que la intersección de las curvas se debe por el incremento de actividades enzimáticas y la migración entre agua, carbohidratos y proteínas. **(Ramírez-Miranda et al., 2014)** demostraron que el deslizamiento de moléculas agua en la superficie del alimento, la humedad de equilibrio y la adsorción dependen de la temperatura.

#### **4.4. Modelado Matemático para la Harina de Torta de Castaña (*Bertholletia excelsa, H.B.K.*)**

Se utilizaron seis modelos matemáticos de las isotermas más comúnmente utilizadas en los alimentos para el modelamiento de las isotermas de adsorción. Además, se utilizó la versión 10.0 del software STATISTICA 2020. Los parámetros se obtienen por regresión no lineal de los datos obtenidos experimentalmente, con un  $R^2$  y %E.

**Tabla 10.** *Parámetros obtenidos a distintos modelos matemáticos a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C.*

| MODELO      | T (°C) | PARAMETROS |          |          |        |          |         | R <sup>2</sup> | %E      | PROMEDIO       |         |
|-------------|--------|------------|----------|----------|--------|----------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|             |        | Xm         | C        | K        | n      | A        | B       |                |         | R <sup>2</sup> | %E      |
| GAB         | 35     | 0.0539     | 227.2266 | 0.853    | -      | -        | -       | 0.9262         | 11.2648 | 0.9571         | 6.8695  |
|             | 45     | 0.0325     | 105.6159 | 0.780    | -      | -        | -       | 0.9848         | 4.6077  |                |         |
|             | 55     | 0.0324     | 23.2355  | 0.425    | -      | -        | -       | 0.9603         | 4.7360  |                |         |
| CHUNG PFOST | 35     | -          | -        | -        | -      | 11.8565  | 39.5871 | 0.9043         | 15.7293 | 0.9385         | 13.0130 |
|             | 45     | -          | -        | -        | -      | -11.6551 | 42.5649 | 0.9705         | 11.8365 |                |         |
|             | 55     | -          | -        | -        | -      | -16.0438 | 46.8264 | 0.9408         | 11.4733 |                |         |
| HALSEY      | 35     | -          | -        | -        | -      | 0.00094  | 2.3231  | 0.9214         | 21.3099 | 0.9369         | 15.7315 |
|             | 45     | -          | -        | -        | -      | 0.00085  | 2.2783  | 0.9789         | 9.0892  |                |         |
|             | 55     | -          | -        | -        | -      | 0.00073  | 2.3674  | 0.9103         | 16.7953 |                |         |
| OSWIN       | 35     | -          | -        | -        | -      | 0.0599   | 0.3761  | 0.9138         | 10.8523 | 0.9368         | 8.0127  |
|             | 45     | -          | -        | -        | -      | 0.0548   | 0.3133  | 0.9814         | 5.2314  |                |         |
|             | 55     | -          | -        | -        | -      | 0.0560   | 0.2113  | 0.9153         | 7.9544  |                |         |
| BET         | 35     | 0.1370     | 0.8348   | -        | -      | -        | -       | 0.7766         | 6.9630  | 0.8423         | 6.2023  |
|             | 45     | 0.0993     | 1.5190   | -        | -      | -        | -       | 0.8221         | 5.9340  |                |         |
|             | 55     | 0.0783     | 3.8241   | -        | -      | -        | -       | 0.9283         | 5.7100  |                |         |
| HENDERSON   | 35     | -          | -        | 180.986  | 1.9824 | -        | -       | 0.8826         | 19.9822 | 0.9333         | 15.0479 |
|             | 45     | -          | -        | 427.584  | 2.2285 | -        | -       | 0.9599         | 15.7435 |                |         |
|             | 55     | -          | -        | 2819.215 | 2.9246 | -        | -       | 0.9573         | 9.4181  |                |         |



La interpretación de los parámetros obtenidos en la tabla 10 indica que, GAB y Oswin son los modelos apropiados que presentaron ajustes superiores en las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña. El promedio de  $R^2$  del modelo de GAB fue de 0.9571 y el promedio del error relativo porcentual de 6.8695%, la temperatura que se ajusta mejor al modelo es de 45°C, ya que presenta un  $R^2$  de 0.9848 y error relativo porcentual de 4.6077%.

El modelo de Oswin también se ajusta a los datos experimentales, presentando promedios de  $R^2$  de 0.9368 y para el error relativo porcentual de 8.0127%, la temperatura que se ajusta mejor al modelo es de 45°C, ya que presenta un  $R^2$  de 0.9814 y error relativo porcentual de 5.2314%.

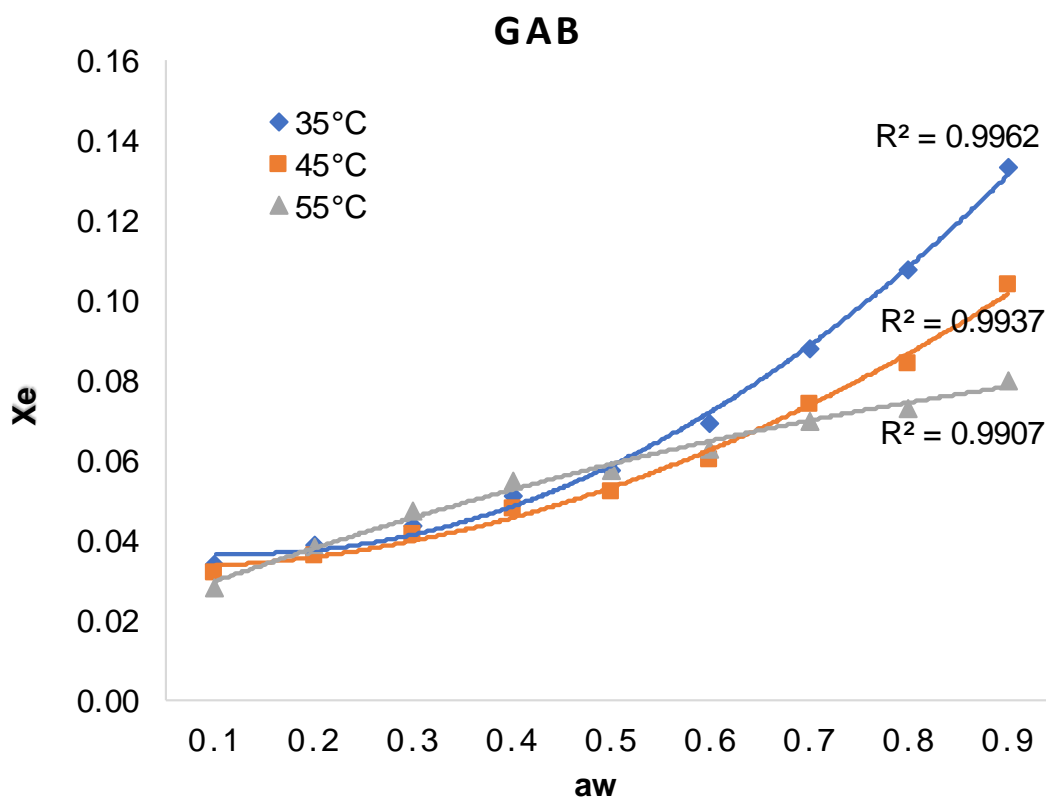
#### 4.4.1. Ajuste de modelos matemáticos

Las Figuras 14, 15, 16, 17, 18 y 19 muestran las isotermas de adsorción de harina de torta de castaña expuesto a 35°C, 45°C y 55°C, a distintos contenidos de  $X_e$  con sus respectivas  $a_w$  que varían desde 0.0979 hasta 0.8880, Ajustado para GAB, CHUNG PFOST, HALSEY, OSWIN, BET y HENDERSON.

##### A) Ajuste para el modelo GAB

**Tabla 11.** El ajuste de datos en el modelo GAB a 35°C, 45°C y 55°C.

| N° | Solución salina  | Temperatura |        |        |        |        |        |
|----|------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    |                  | 35°C        |        | 45°C   |        | 55°C   |        |
|    |                  | $a_w$       | $X_e$  | $a_w$  | $X_e$  | $a_w$  | $X_e$  |
| 1  | (LiCl)           | 0.1081      | 0.0342 | 0.1028 | 0.0319 | 0.0979 | 0.0282 |
| 2  | ( $KC_2H_3O_2$ ) | 0.2155      | 0.0389 | 0.1974 | 0.0366 | 0.1818 | 0.0385 |
| 3  | ( $MgCl_2$ )     | 0.3180      | 0.0439 | 0.3084 | 0.0416 | 0.2995 | 0.0476 |
| 4  | ( $K_2CO_3$ )    | 0.4363      | 0.0512 | 0.4299 | 0.0480 | 0.4240 | 0.0549 |
| 5  | ( $MgNO_3$ )     | 0.5154      | 0.0574 | 0.4970 | 0.0523 | 0.4803 | 0.0579 |
| 6  | ( $NaNO_2$ )     | 0.6280      | 0.0694 | 0.6007 | 0.0605 | 0.5761 | 0.0630 |
| 7  | (NaCl)           | 0.7430      | 0.0882 | 0.7258 | 0.0744 | 0.7101 | 0.0701 |
| 8  | (KCl)            | 0.8211      | 0.1078 | 0.7909 | 0.0844 | 0.7635 | 0.0732 |
| 9  | ( $BaCl_2$ )     | 0.8880      | 0.1333 | 0.8827 | 0.1039 | 0.8778 | 0.0801 |



*Figura 14.* Isoterma de adsorción ajustada al modelo de GAB para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.

La figura 14 es representación gráfica de la tabla 11, representa el ajuste de los datos obtenidos en la parte experimental a distintas temperaturas evaluadas por GAB, las curvas ajustadas a este modelo presentan similitud a las curvas experimentales obtenidas, el promedio del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0.9571 este valor indica que existe buena relación del modelo en las isotermas experimentales ya que está cercano a la unidad, y el promedio del porcentaje de error medio relativo (%E) = 6.8695%, mientras este valor sea próximo a cero es favorable para representar las isotermas experimentales. El gráfico se asemeja a la isoterma de tipo II esto ocurre cuando la interacción adsorbato-adsorbente es baja. Este modelo indica que la harina de torta de castaña adsorbe muy poca humedad en los locales de almacenamiento. (Huaman Yuca, 2016) también menciona que GAB tiene un ajuste superior para la harina de castaña. El ajuste de los datos de este modelo coincide con los datos experimentales y por lo tanto es el modelo indicado para representar a las curvas experimentales de la harina de torta de castaña.

## B) Ajuste para el modelo CHUNG PFOST

Tabla 12. El ajuste de datos en el modelo CHUNG PFOST a 35°C, 45°C y 55°C.

| N° | Solución salina  | Temperatura |        |        |        |        |        |
|----|------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    |                  | 35°C        |        | 45°C   |        | 55°C   |        |
|    |                  | $a_w$       | Xe     | $a_w$  | Xe     | $a_w$  | Xe     |
| 1  | (LiCl)           | 0.1081      | 0.0264 | 0.1028 | 0.0279 | 0.0979 | 0.0352 |
| 2  | ( $KC_2H_3O_2$ ) | 0.2155      | 0.0341 | 0.1974 | 0.0334 | 0.1818 | 0.0391 |
| 3  | ( $MgCl_2$ )     | 0.3180      | 0.0429 | 0.3084 | 0.0407 | 0.2995 | 0.0450 |
| 4  | ( $K_2CO_3$ )    | 0.4363      | 0.0549 | 0.4299 | 0.0500 | 0.4240 | 0.0519 |
| 5  | ( $MgNO_3$ )     | 0.5154      | 0.0639 | 0.4970 | 0.0557 | 0.4803 | 0.0552 |
| 6  | ( $NaNO_2$ )     | 0.6280      | 0.0784 | 0.6007 | 0.0652 | 0.5761 | 0.0612 |
| 7  | (NaCl)           | 0.7430      | 0.0951 | 0.7258 | 0.0781 | 0.7101 | 0.0703 |
| 8  | (KCl)            | 0.8211      | 0.1075 | 0.7909 | 0.0853 | 0.7635 | 0.0741 |
| 9  | ( $BaCl_2$ )     | 0.8880      | 0.1188 | 0.8827 | 0.0962 | 0.8778 | 0.0827 |

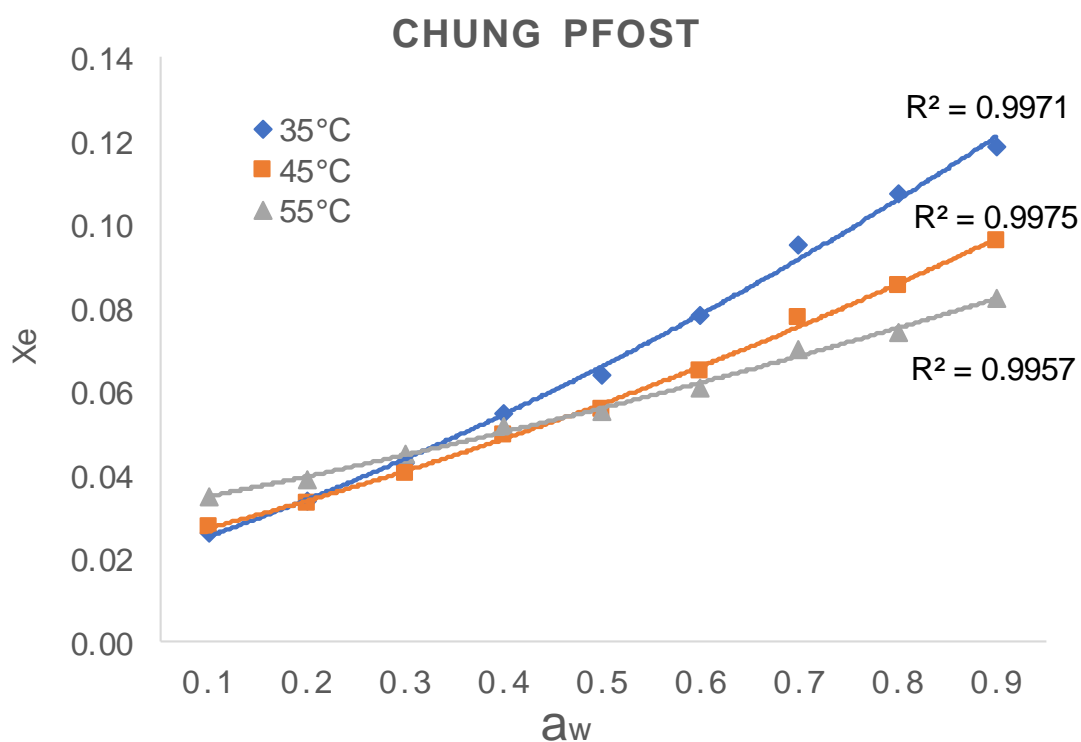


Figura 15. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de CHUNG PFOST para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.

La figura 15 es representación gráfica de la tabla 12 representa el ajuste de los datos obtenidos en la parte experimental a distintas temperaturas evaluadas por CHUNG PFOST, las curvas ajustadas a este modelo no presentan similitud a las curvas experimentales obtenidas. El promedio del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0.9385 este valor indica que existe buena relación del modelo en las isotermas experimentales, ya que está cercano a la unidad, este valor es menor al valor del modelo de GAB. El promedio del porcentaje de error medio relativo (%E) = 13.0130%, mientras este valor sea próximo a cero es favorable para representar las isotermas experimentales, este valor es mayor que el valor del modelo de GAB, por lo tanto, es menos favorable para la representación de las curvas experimentales. El ajuste de los datos de este modelo no se asemeja a los datos experimentales y por lo tanto no es el modelo indicado para representar a las curvas experimentales de la harina de torta de castaña.

### C) Ajuste para el modelo HALSEY

**Tabla 13.** El ajuste de datos en el modelo HALSEY a 35°C, 45°C y 55°C.

| N° | Solución salina  | Temperatura |        |        |        |        |        |
|----|------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    |                  | 35°C        |        | 45°C   |        | 55°C   |        |
|    |                  | $a_w$       | Xe     | $a_w$  | Xe     | $a_w$  | Xe     |
| 1  | (LiCl)           | 0.1081      | 0.0264 | 0.1028 | 0.0279 | 0.0979 | 0.0352 |
| 2  | ( $KC_2H_3O_2$ ) | 0.2155      | 0.0341 | 0.1974 | 0.0334 | 0.1818 | 0.0391 |
| 3  | ( $MgCl_2$ )     | 0.3180      | 0.0429 | 0.3084 | 0.0407 | 0.2995 | 0.0450 |
| 4  | ( $K_2CO_3$ )    | 0.4363      | 0.0549 | 0.4299 | 0.0500 | 0.4240 | 0.0519 |
| 5  | ( $MgNO_3$ )     | 0.5154      | 0.0639 | 0.4970 | 0.0557 | 0.4803 | 0.0552 |
| 6  | ( $NaNO_2$ )     | 0.6280      | 0.0784 | 0.6007 | 0.0652 | 0.5761 | 0.0612 |
| 7  | (NaCl)           | 0.7430      | 0.0951 | 0.7258 | 0.0781 | 0.7101 | 0.0703 |
| 8  | (KCl)            | 0.8211      | 0.1075 | 0.7909 | 0.0853 | 0.7635 | 0.0741 |
| 9  | ( $BaCl_2$ )     | 0.8880      | 0.1188 | 0.8827 | 0.0962 | 0.8778 | 0.0827 |

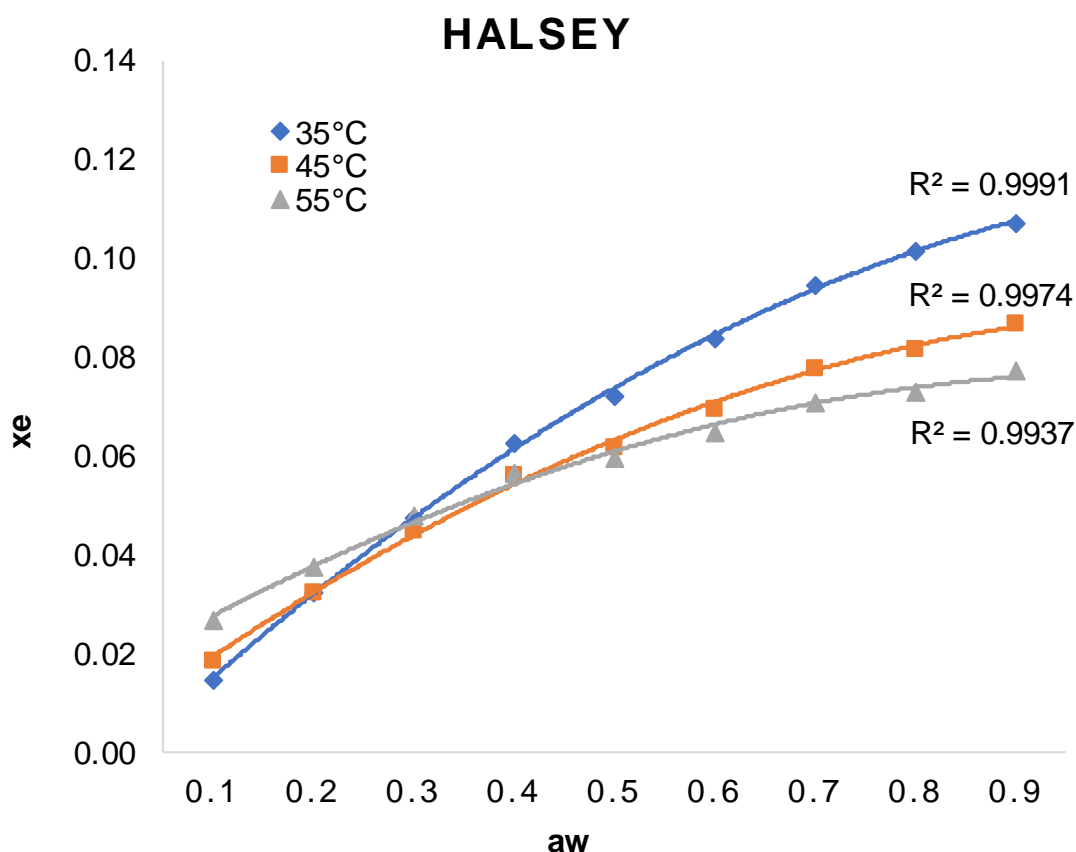


Figura 16. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de HALSEY para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.

La figura 16 es representación gráfica de la tabla 13, representa el ajuste de los datos obtenidos en la parte experimental a distintas temperaturas evaluadas por HALSEY, las curvas ajustadas a este modelo no presentan similitud a las curvas experimentales obtenidas. El promedio del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0.9369, este valor indica que existe buena relación del modelo en las isothermas experimentales, ya que está cercano a la unidad, este valor es menor al valor del modelo de GAB y CHUNG PFOST. El promedio del porcentaje de error medio relativo (%E) = 15.7315%, mientras este valor sea próximo a cero es favorable para representar las isothermas experimentales, este valor es mayor que el valor del modelo de GAB y CHUNG PFOST, por lo tanto, es menos favorable para la representación de las curvas experimentales. El grafico es más próximo a la isoterma tipo III, el ajuste de los datos a este modelo coincide con la temperatura experimental de 55°C, mas no con las demás temperaturas, por lo tanto, no es el modelo

indicado para representar a las curvas experimentales de la harina de torta de castaña.

#### D) Ajuste para el modelo OSWIN

Tabla 14. El ajuste de datos en el modelo OSWIN a 35°C, 45°C y 55°C.

| N° | Solución salina  | Temperatura |        |        |        |        |        |
|----|------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    |                  | 35°C        |        | 45°C   |        | 55°C   |        |
|    |                  | $a_w$       | Xe     | $a_w$  | Xe     | $a_w$  | Xe     |
| 1  | (LiCl)           | 0.1081      | 0.0271 | 0.1028 | 0.0278 | 0.0979 | 0.0351 |
| 2  | ( $KC_2H_3O_2$ ) | 0.2155      | 0.0368 | 0.1974 | 0.0353 | 0.1818 | 0.0408 |
| 3  | ( $MgCl_2$ )     | 0.3180      | 0.0449 | 0.3084 | 0.0425 | 0.2995 | 0.0469 |
| 4  | ( $K_2CO_3$ )    | 0.4363      | 0.0544 | 0.4299 | 0.0501 | 0.4240 | 0.0526 |
| 5  | ( $MgNO_3$ )     | 0.5154      | 0.0613 | 0.4970 | 0.0546 | 0.4803 | 0.0552 |
| 6  | ( $NaNO_2$ )     | 0.6280      | 0.0729 | 0.6007 | 0.0622 | 0.5761 | 0.0598 |
| 7  | (NaCl)           | 0.7430      | 0.0892 | 0.7258 | 0.0743 | 0.7101 | 0.0678 |
| 8  | (KCl)            | 0.8211      | 0.1062 | 0.7909 | 0.0831 | 0.7635 | 0.0718 |
| 9  | ( $BaCl_2$ )     | 0.8880      | 0.1304 | 0.8827 | 0.1030 | 0.8778 | 0.0851 |

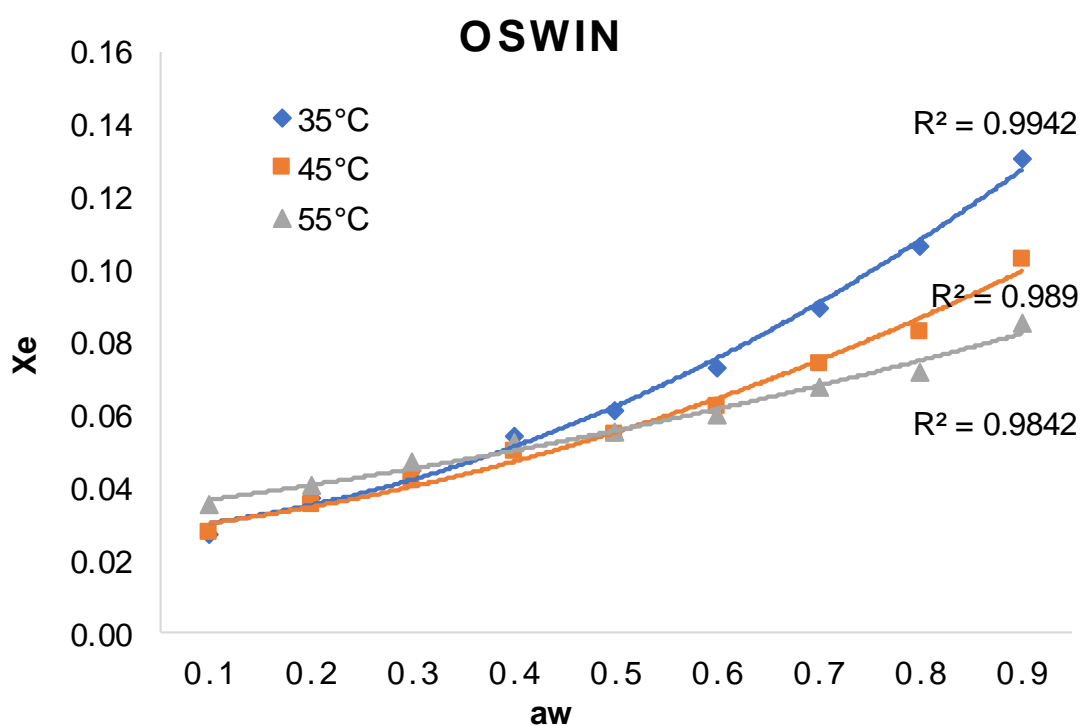


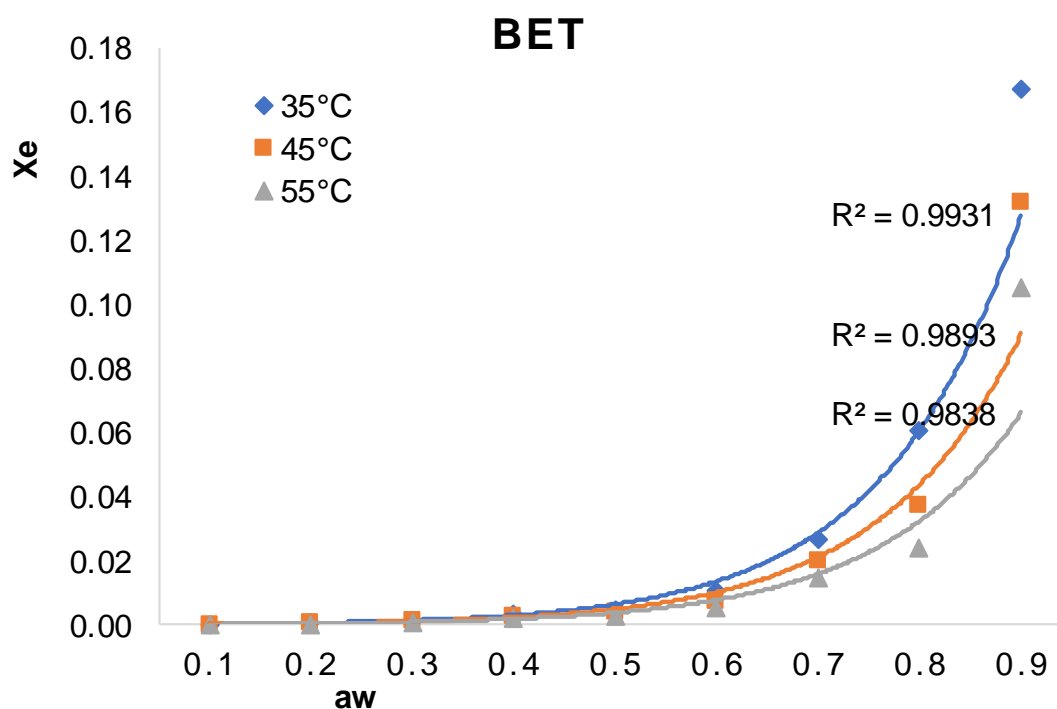
Figura 17. Isotherma de adsorción ajustada al modelo de OSWIN para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.

La figura 17 es representación gráfica de la tabla 14, representa el ajuste de los datos obtenidos en la parte experimental a distintas temperaturas evaluadas por OSWIN, las curvas ajustadas a este modelo presentan similitud a las curvas experimentales obtenidas. El promedio del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0.9368, este valor indica que existe buena relación del modelo en las isothermas experimentales, ya que está cercano a la unidad, este valor es menor al valor del modelo de GAB, CHUNG PFOST y HALSEY. El promedio del porcentaje de error medio relativo (%E) = 8.0127%, mientras este valor sea próximo a cero es favorable para representar las isothermas experimentales, este valor es mayor que el valor del modelo de GAB y menor que CHUNG PFOST y HALSEY, por lo tanto, es favorable para la representación de las curvas experimentales. El grafico se asemeja a la isoterma de tipo II esto ocurre cuando la interacción adsorbato-adsorbente es baja. Este modelo indica que la harina de torta de castaña adsorbe muy poca humedad en los locales de almacenamiento. (Huaman Yuca, 2016) también menciona que los resultados de GAB obtuvieron un ajuste superior para la harina de castaña. Por lo tanto, es el modelo indicado para representar las curvas experimentales de la harina de torta de castaña.

### E) Ajuste para el modelo BET

Tabla 15. El ajuste de datos en el modelo BET a 35°C, 45°C y 55°C.

| N° | Solución salina  | Temperatura |        |        |        |        |        |
|----|------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    |                  | 35°C        |        | 45°C   |        | 55°C   |        |
|    |                  | $a_w$       | Xe     | $a_w$  | Xe     | $a_w$  | Xe     |
| 1  | (LiCl)           | 0.1081      | 0.0003 | 0.1028 | 0.0003 | 0.0979 | 0.0002 |
| 2  | ( $KC_2H_3O_2$ ) | 0.2155      | 0.0008 | 0.1974 | 0.0006 | 0.1818 | 0.0005 |
| 3  | ( $MgCl_2$ )     | 0.3180      | 0.0016 | 0.3084 | 0.0013 | 0.2995 | 0.0011 |
| 4  | ( $K_2CO_3$ )    | 0.4363      | 0.0032 | 0.4299 | 0.0027 | 0.4240 | 0.0023 |
| 5  | ( $MgNO_3$ )     | 0.5154      | 0.0052 | 0.4970 | 0.0040 | 0.4803 | 0.0032 |
| 6  | ( $NaNO_2$ )     | 0.6280      | 0.0107 | 0.6007 | 0.0078 | 0.5761 | 0.0057 |
| 7  | (NaCl)           | 0.7430      | 0.0266 | 0.7258 | 0.0199 | 0.7101 | 0.0151 |
| 8  | (KCl)            | 0.8211      | 0.0606 | 0.7909 | 0.0373 | 0.7635 | 0.0244 |
| 9  | ( $BaCl_2$ )     | 0.8880      | 0.1672 | 0.8827 | 0.1323 | 0.8778 | 0.1052 |



*Figura 18.* Isoterma de adsorción ajustada al modelo de BET para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.

La figura 18 es representación gráfica de la tabla 15, representa el ajuste de los datos obtenidos en la parte experimental a distintas temperaturas evaluadas por BET, las curvas ajustadas a este modelo no presentan similitud a las curvas experimentales obtenidas. El promedio del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0.8423, este valor no está tan cercano a la unidad, es menor al valor de los modelos de GAB, CHUNG PFOST, HALSEY y OSWIN. El promedio del porcentaje de error medio relativo (%E) = 6.2023%, si este valor es próximo a cero es favorable para representar las isothermas experimentales, sin embargo, el valor es menor que el valor de los modelos de GAB, CHUNG PFOST, HALSEY y OSWIN. Por lo tanto, no es el modelo indicado para representar a las curvas experimentales de la harina de torta de castaña, debido a que el  $R^2$  es menor que los demás modelos.



## F) Ajuste para el modelo HENDERSON

Tabla 16. El ajuste de datos en el modelo HENDERSON a 35°C, 45°C y 55°C.

| N° | Solución salina  | Temperatura |        |        |        |        |        |
|----|------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    |                  | 35°C        |        | 45°C   |        | 55°C   |        |
|    |                  | $a_w$       | $X_e$  | $a_w$  | $X_e$  | $a_w$  | $X_e$  |
| 1  | (LiCl)           | 0.1081      | 0.0163 | 0.1028 | 0.0196 | 0.0979 | 0.0278 |
| 2  | ( $KC_2H_3O_2$ ) | 0.2155      | 0.0310 | 0.1974 | 0.0312 | 0.1818 | 0.0373 |
| 3  | ( $MgCl_2$ )     | 0.3180      | 0.0443 | 0.3084 | 0.0429 | 0.2995 | 0.0472 |
| 4  | ( $K_2CO_3$ )    | 0.4363      | 0.0592 | 0.4299 | 0.0543 | 0.4240 | 0.0556 |
| 5  | ( $MgNO_3$ )     | 0.5154      | 0.0689 | 0.4970 | 0.0602 | 0.4803 | 0.0590 |
| 6  | ( $NaNO_2$ )     | 0.6280      | 0.0824 | 0.6007 | 0.0687 | 0.5761 | 0.0642 |
| 7  | (NaCl)           | 0.7430      | 0.0958 | 0.7258 | 0.0784 | 0.7101 | 0.0708 |
| 8  | (KCl)            | 0.8211      | 0.1047 | 0.7909 | 0.0832 | 0.7635 | 0.0733 |
| 9  | ( $BaCl_2$ )     | 0.8880      | 0.1123 | 0.8827 | 0.0898 | 0.8778 | 0.0782 |

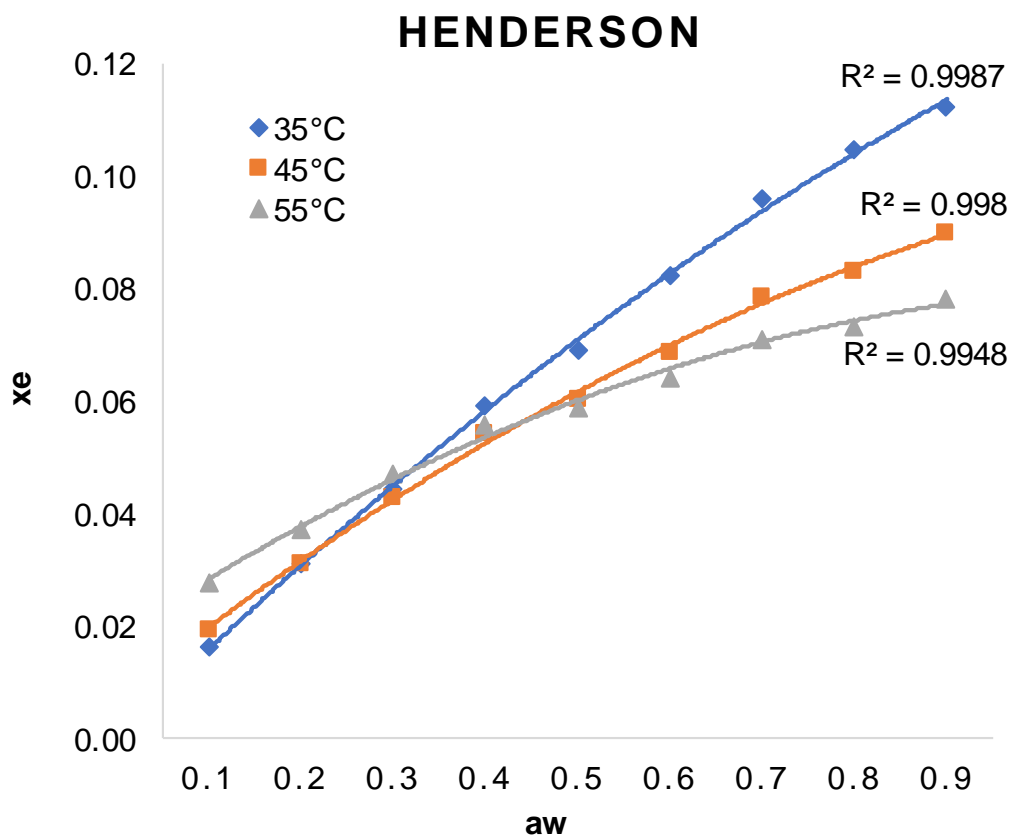


Figura 19. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de HENDERSON para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C.

La figura 19 es representación gráfica de la tabla 16, representa el ajuste de los datos obtenidos en la parte experimental a distintas temperaturas evaluadas por el modelo de HENDERSON, las curvas ajustadas a este modelo no presentan similitud a las curvas experimentales obtenidas. El promedio del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0.9333, este valor indica que existe buena relación del modelo en las isotermas experimentales, ya que está cercano a la unidad, este valor es menor al valor de los modelos de GAB, CHUNG PFOST, HALSEY, OSWIN y mayor al de BET. El promedio del porcentaje de error medio relativo (%E) = 15.0479%, mientras este valor sea próximo a cero es favorable para representar las isotermas experimentales, dicho valor es mayor a todos los modelos con excepción de HALSEY, Por lo tanto, no es el modelo indicado para representar a las curvas experimentales de la harina de torta de castaña.

#### 4.5. Evaluación de los parámetros obtenidos

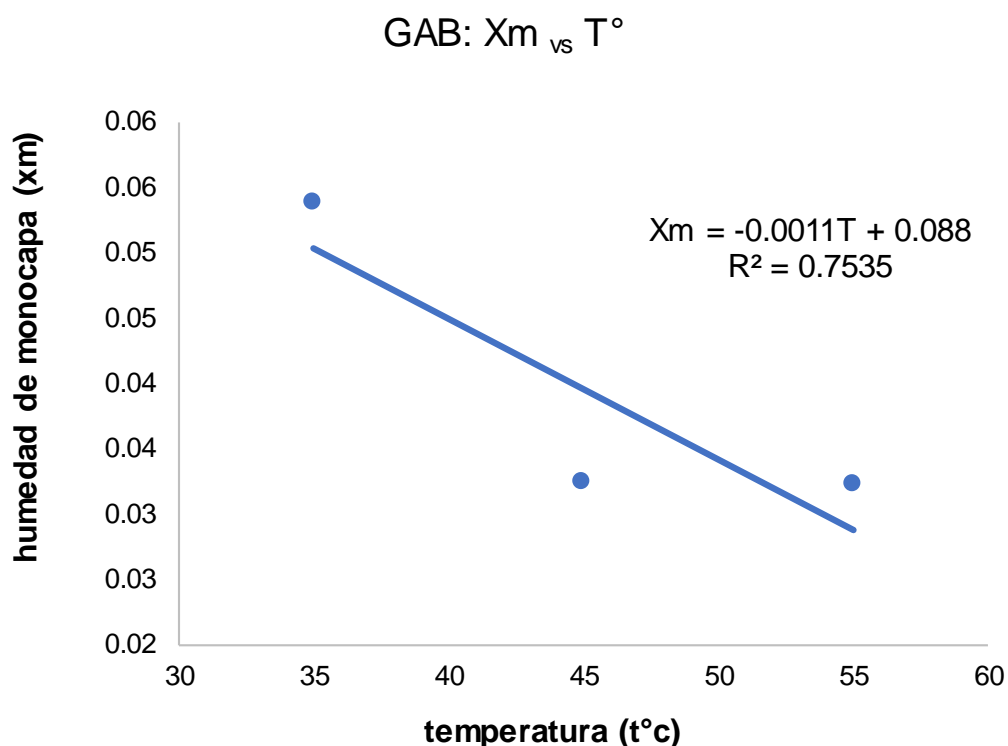
##### 4.5.1. Evaluación del parámetro “Xm” de GAB

(Ramírez Colorado, 2018) indica que la humedad de la monocapa ( $X_m$ ) obtenido por el modelo GAB es la cantidad de agua (gr H<sub>2</sub>O/gr m.s) que está fuertemente enlazada en todo los sitios activos de la fase sólida adsorbente del alimento y su valor es considerado como la estabilidad del alimento durante su almacenamiento.

El contenido de la monocapa ( $X_m$ ) depende de la temperatura, por lo que, si se realiza un análisis de este valor por regresión lineal, se tiene:

**Tabla 17.** Datos de las temperaturas y las humedades de monocapa  $X_m$  obtenidos a partir del modelo de GAB.

| MODELO | T (°C) | $X_m$  |
|--------|--------|--------|
| GAB    | 35     | 0.0539 |
|        | 45     | 0.0325 |
|        | 55     | 0.0324 |



*Figura 20.* Gráfico de las temperaturas y las humedades de monocapa  $X_m$  obtenidos a partir del modelo de GAB.

Las humedades de monocapa ( $X_m$ ) para el modelo de **GAB** decreció con el incremento de temperatura, desde 0.0539 hasta 0.0324 (g agua/g masa seca), comportamientos similares se ha presentado en distintos alimentos tal como lo indica; (**Vega Gálvez, Lara Aravena y Lemus Mondaca, 2006**) para harina de maíz, (**Valeriano Tonon, 2009**) para jugo de huasai, (**Oliveira, et al., 2009**) para micro algas, y (**Ccalli Pacco, 2003**) para higo seco.

Este comportamiento puede explicarse por el hecho de que a medida que aumenta la temperatura, los puntos activos que enlazan al agua y la parte superficial del alimento se dañan, provocando la deshidratación. Otros trabajos de investigación han descubierto que los efectos del aumento de temperatura son cambios químicos y físicos, es decir, puntos activos en la superficie del alimento a los que se adhiere el vapor de agua debido a la reducción de los puentes de hidrógeno (**Al-Muhtaseb, McMinn y Magee, 2002**).

Se puede afirmar que la humedad de monocapa ( $X_m$ ) depende de la temperatura. Por lo tanto, al analizar los valores de  $X_m$  por regresión lineal,

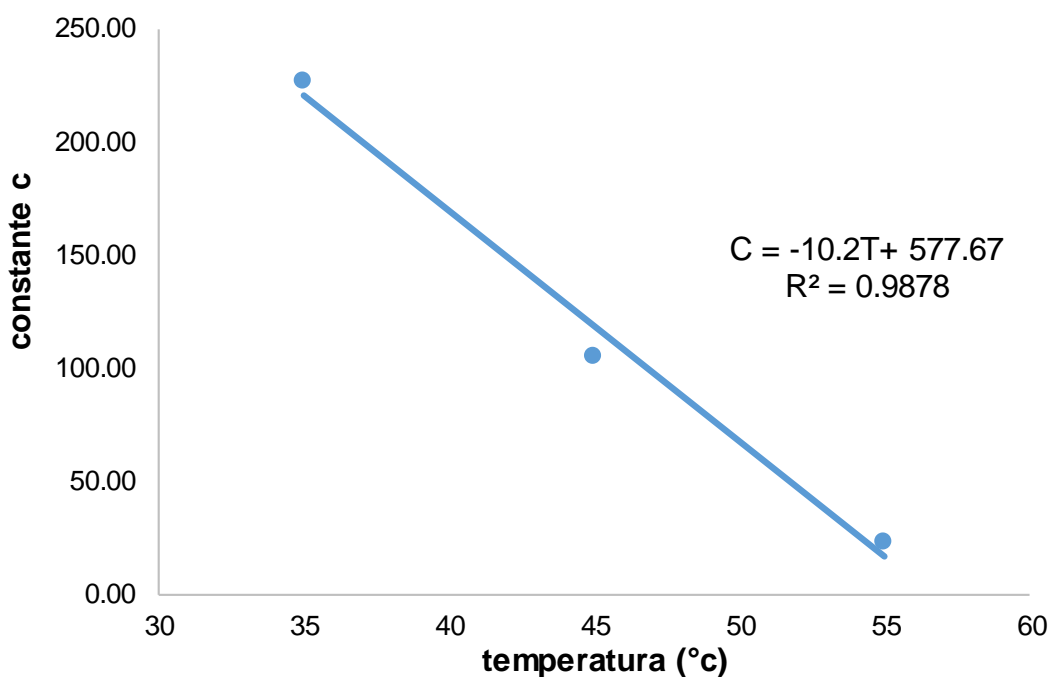
se tiene la siguiente ecuación  $X_m = -0.0011T + 0.088$  que expresa  $R^2$  de 0.7535, lo que significa que presenta una relación regularmente buena, en cuanto a la ecuación de la humedad de monocapa se afirma que la pendiente es negativa y la humedad de monocapa es dependiente a la temperatura, ya que conforme se incrementa la temperatura disminuye la humedad de monocapa. (Choque Q., Cáceres H. y Solano R., 2009) también encontraron interacción negativa para la humedad de monocapa de GAB, para la deshidratación de uvas.

#### 4.5.2. Evaluación del parámetro “C” de GAB

**Tabla 18.** Datos de las temperaturas y los parámetros “C” obtenidos a partir del modelo de GAB.

| MODELO | T (°C) | C        |
|--------|--------|----------|
| GAB    | 35     | 227.2266 |
|        | 45     | 105.6159 |
|        | 55     | 23.2355  |

#### GAB: CONSTANTE C vs T°



*Figura 21.* Gráfico de las temperaturas y los parámetros “C” obtenidos a partir del modelo de GAB.

El parámetro “C” de GAB es un indicador sobre la relación de los sitios activos de la superficie del alimento y la humedad el ambiente **(Choque Q., Caceres H. y Solano R., 2009)**. La constante “C” es un valor que disminuye conforme va aumentando la temperatura, este valor indica el comportamiento de las moléculas de agua de la harina de torta de castaña y las moléculas presentes en el ambiente. Es decir, es un valor que indica que, mientras sea mínimo, la ganancia de humedad de la monocapa será menor y cuando sea máximo será mayor.

En la figura 21 se muestra que existe correlación negativa para el parámetro “C” y la temperatura, presentando un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.9878 y una ecuación de  $C = -10.2T + 577.67$ , lo que indica que existe dependencia con la temperatura. **(Guzmán-Hincapié y Zapata, 2018)** indican que conforme la temperatura incrementa la constante “C” disminuye. Esto es debido a que la constante “C” está relacionada con la humedad de la monocapa **(González Hurtado et al., 2014)**, se puede concluir que, a mayor temperatura, menor será la constante “C” y menor será la humedad de la monocapa.

#### 4.5.3. Evaluación del parámetro “K” de GAB

Al incorporar el parámetro K, este modelo asume que la molécula multicapa interactúa con el adsorbente a un valor energético similar a las moléculas de la monocapa **(Villalva Chacon, 2019)**.

**Tabla 19.** Datos de las temperaturas y los parámetros “K” obtenidos a partir del modelo de GAB.

| MODELO | T (°C) | K     |
|--------|--------|-------|
| GAB    | 35     | 0.853 |
|        | 45     | 0.780 |
|        | 55     | 0.425 |

### GAB: CONSTANTE K vs T°

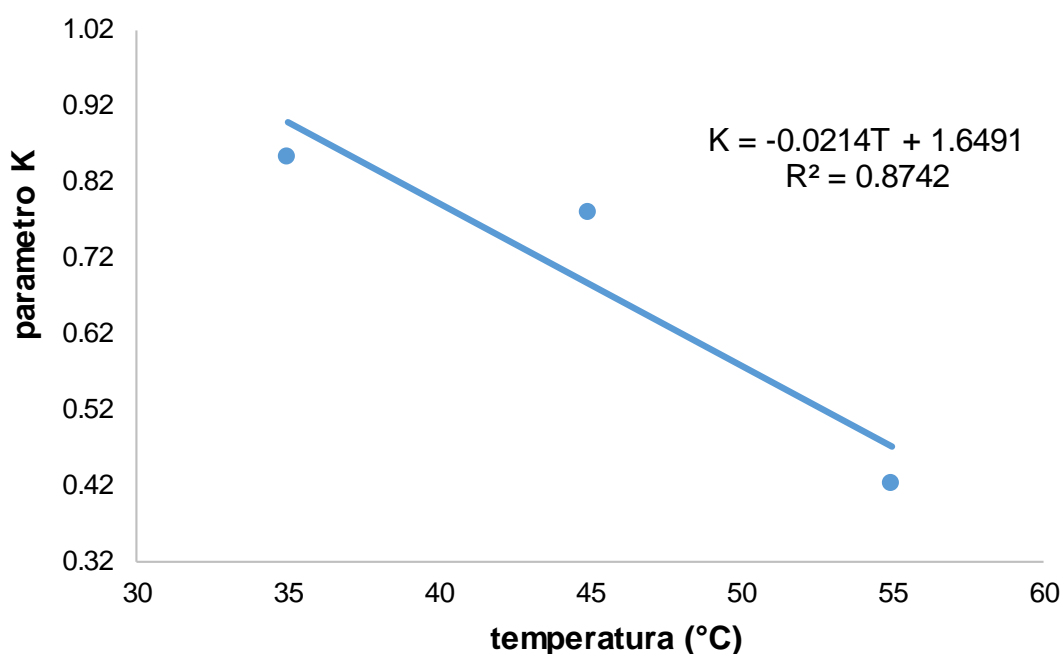


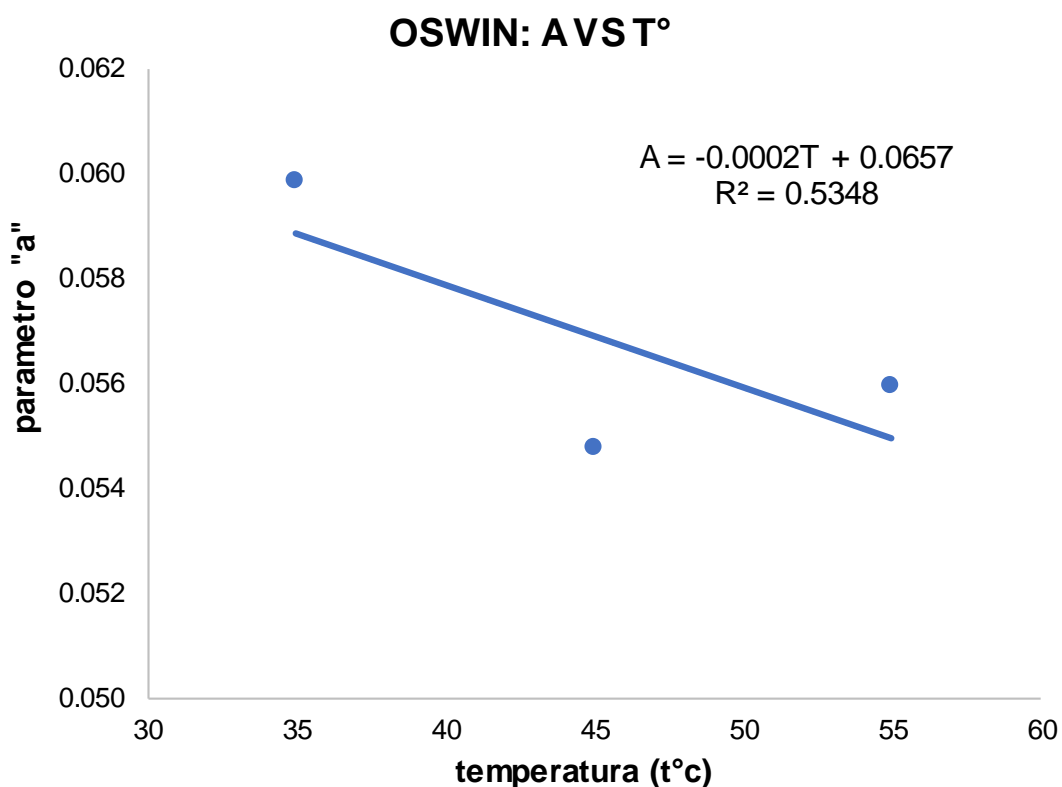
Figura 22. Gráfico de las temperaturas y los parámetros “K” obtenidos a partir del modelo de GAB.

El valor K de la harina de torta de castaña disminuye al aumentar la temperatura de desde 0.853 hasta 0.425; **(Ovalle Focori, 2015)** observó el mismo comportamiento para harina de pijuayo. Basado en el comportamiento del parámetro KGAB anterior, se puede decir que este parámetro depende de la temperatura. Por lo tanto, el análisis de los datos por regresión lineal revela la ecuación  $K=0.0214T+1.6491$ , con un  $R^2$  de 0.8742.

#### 4.5.4. Evaluación del parámetro “A” de OSWIN

Tabla 20. Datos de las temperaturas y los parámetros “A” obtenidos a partir del modelo de OSWIN.

| MODELO | T (°C) | A      |
|--------|--------|--------|
| OSWIN  | 35     | 0.0599 |
|        | 45     | 0.0548 |
|        | 55     | 0.0560 |



*Figura 23.* Gráfico de las temperaturas y los parámetros “A” obtenidos a partir del modelo de OSWIN.

El parámetro "A" del modelo de Oswin tiene relación con las temperaturas de las diferentes isotermas, por lo que, al analizar el valor de este parámetro por regresión lineal, se da la ecuación de;  $A = -0.0002T + 0.0657$  con un  $R^2$  de 0.5348, lo que significa que presenta una correlación buena por lo que los datos están dispersos. En cuanto a la ecuación se afirma que la pendiente es negativa y el parámetro “A” es dependiente a la temperatura, ya que conforme se incrementa la temperatura disminuye el parámetro “A”.

Resultados similares encontraron; **(Ovalle Focori, 2015)** para harina de pijuayo y **(Huamán Yuca, 2016)** para harina de castaña.

#### 4.5.5. Evaluación del parámetro “B” de OSWIN

Tabla 21. Datos de las temperaturas y los parámetros “B” obtenidos a partir del modelo de OSWIN.

| MODELO | T (°C) | B      |
|--------|--------|--------|
| OSWIN  | 35     | 0.3761 |
|        | 45     | 0.3133 |
|        | 55     | 0.2113 |

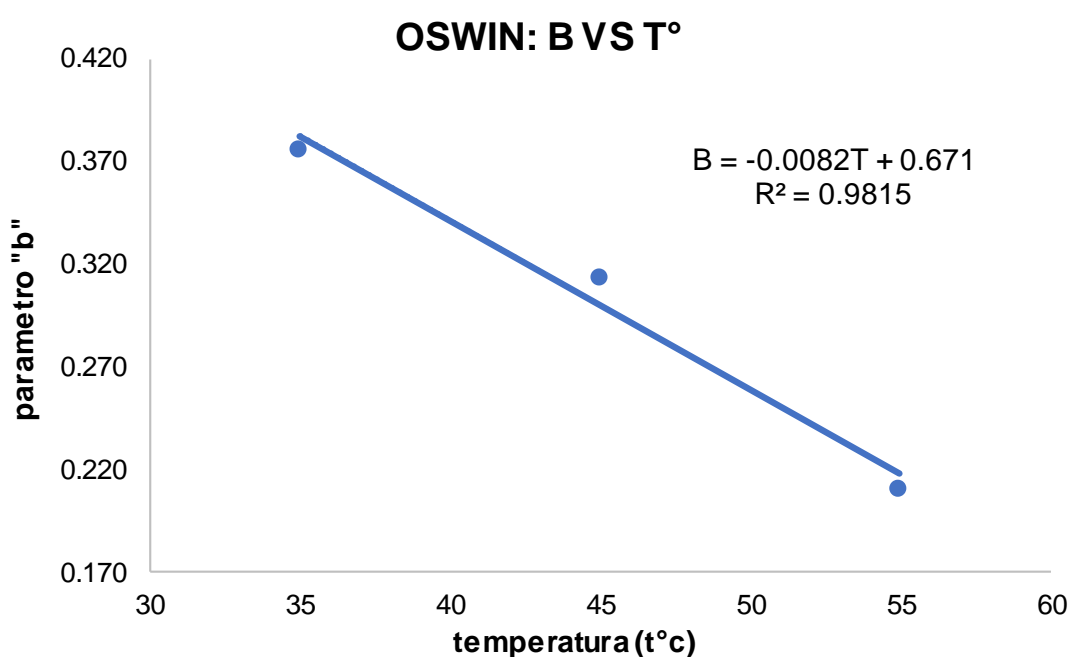


Figura 24. Gráfico de las temperaturas y los parámetros “B” obtenidos a partir del modelo de OSWIN.

El parámetro "B" del modelo de Oswin tiene relación con las temperaturas de las diferentes isotermas, por lo que, al analizar el valor de este parámetro por regresión lineal, se da la ecuación de;  $B = -0.0082T + 0.671$  con un  $R^2$  de 0.9815, lo que significa que existe buena relación entre el parámetro “B” y la temperatura, ya que conforme incrementa la temperatura el parámetro “B” disminuye. En cuanto a la ecuación se puede apreciar que la pendiente es negativa y el parámetro “B” es dependiente a la temperatura. **(Guzmán-Hincapié y Zapata, 2018)** encontraron resultados similares en Propiedades Termodinámicas e Isotermas de Sorción de Sales con Interés Alimentario.



#### 4.6. Calor Isostérico de Adsorción (qst)

Al calcular qst, fue de gran ayuda para comprender el mecanismo de adsorción e interacción entre el agua y la harina de torta de castaña, los sitios activos de la humedad y la unión del adsorbente es el proceso de adsorción (Martín Santos, 2015). El efecto de la temperatura en el proceso de adsorción, el calor isostérico y contenido de agua de los alimentos, son información de gran utilidad para el secado, almacenamiento y acondicionamiento de los alimentos (Guzmán-Hincapié y Zapata, 2018).

Para el cálculo del calor isostérico de adsorción se utilizó la siguiente formula:

$$q_{st} = q_0 \exp\left(\frac{-x_e}{x_0}\right) \dots \dots \dots (13)$$

Donde:

$q_0$  = Calor isostérico de sorción de la primera molécula de agua (KJ/mol).

$x_e$  =Contenido de humedad de equilibrio (g agua/g m.s.).

$x_0$  = Contenido de humedad inicial del material alimenticio (g agua/g m.s.).

**Tabla 22.** calor isostérico de adsorción (qst) de harina de torta de castaña a distintas humedades de equilibrio.

| Nº | Xe (b.s.) | qst (exp.) <sup>a</sup> (Kj/mol) | qst (cal.) <sup>b</sup> (Kj/mol) |
|----|-----------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1  | 0.0299    | 11.7631                          | 11.7818                          |
| 2  | 0.0419    | 7.0123                           | 6.6659                           |
| 3  | 0.0438    | 4.1248                           | 4.5444                           |
| 4  | 0.0499    | 2.1970                           | 2.2803                           |
| 5  | 0.0588    | 1.3962                           | 1.2239                           |
| 6  | 0.0667    | 0.5179                           | 0.3076                           |
| 7  | 0.0693    | 0.0555                           | 0.0259                           |
| 8  | 0.0921    | -0.0859                          | 0.0022                           |
| 9  | 0.1057    | -0.2819                          | 0.0001                           |

a: Qst experimental obtenido de acuerdo con la Ecuación 12.

b: Qst calculado obtenido de acuerdo con la Ecuación 13.

#### 4.6.1. Representación lineal de $-\ln(a_w)$ frente a $1/T$ de la ecuación de Clausius-Clapeyron

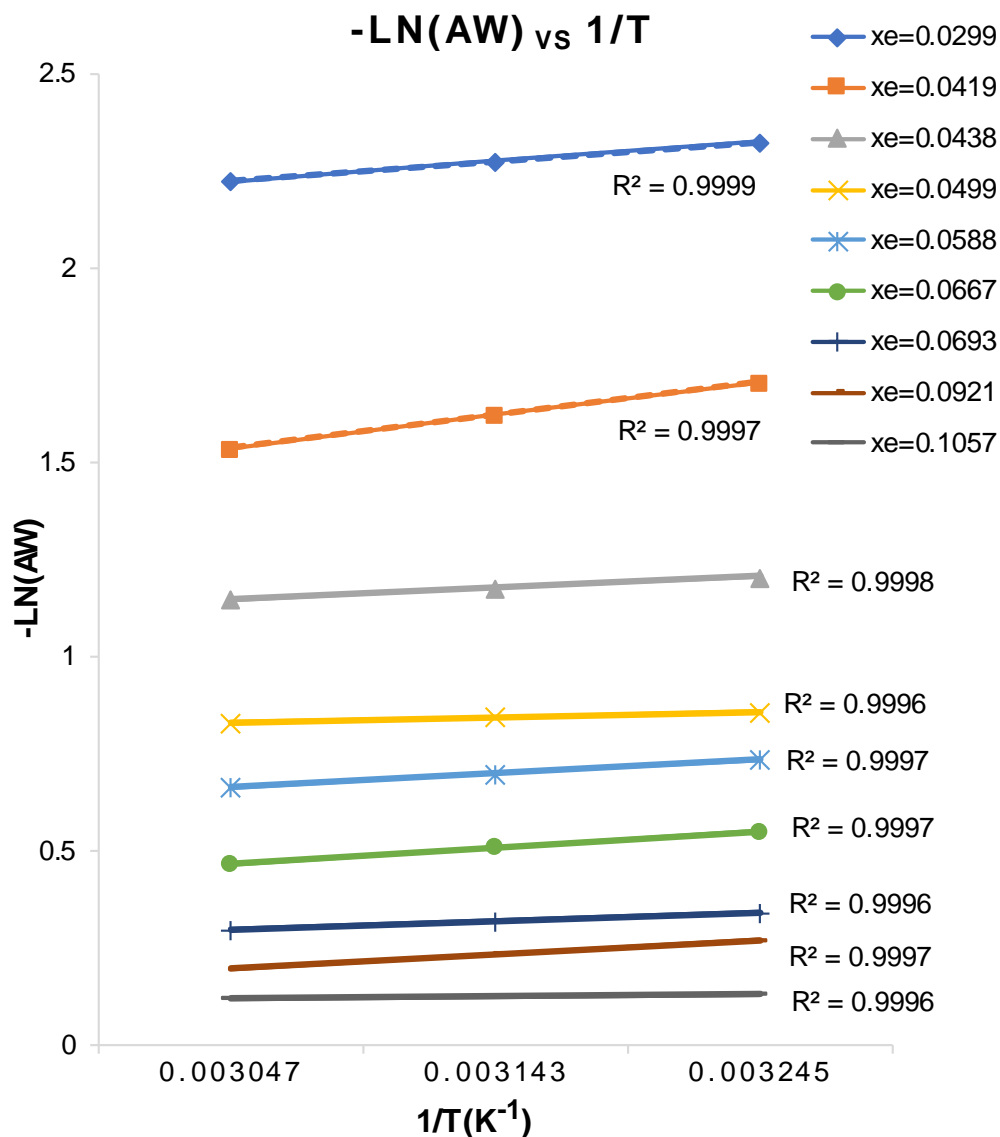


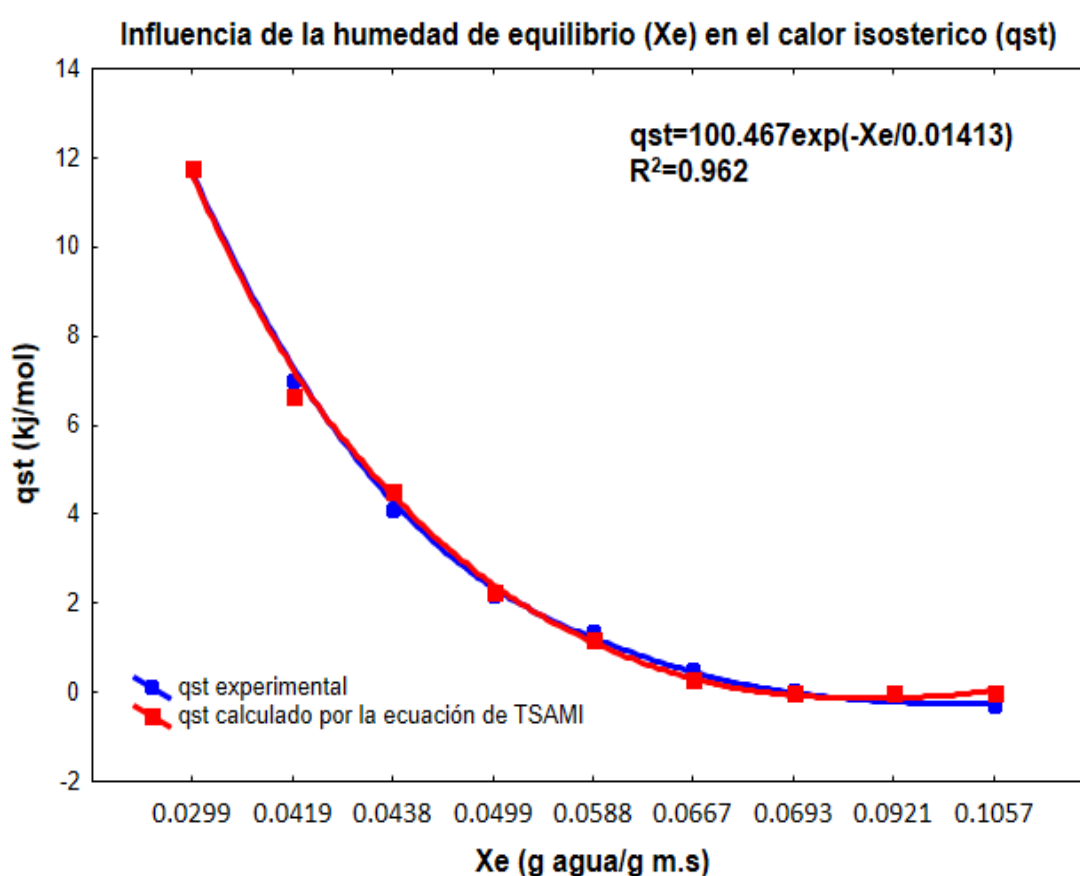
Figura 25. Gráfico de  $-\ln(a_w)$  versus  $1/T$  para calcular el qst de harina de torta de castaña para distintas humedades de equilibrio ( $X_e$ ).

La Figura 25 muestra una representación lineal de;  $-\ln(a_w)$  comparado con  $1/T$  de la ecuación de Clausius -Clapeyron para valores de humedades de equilibrio ( $X_e$ ). Debido a la inclinación de cada línea, el calor isostérico de adsorción ha sido determinado. Los valores de  $R^2$  para estas líneas son superiores a 0,999, lo que es apropiado.

La actividad de agua ( $a_w$ ) aumentó con el incremento de la temperatura, entonces se podría decir que la temperatura( $T^0$ ) influye con la actividad de agua( $a_w$ ). Similares tendencias fueron obtenidas por; **(Sahu, Patel y**

**Khokhar, 2021**) en su investigación denominada “Comportamiento de sorción y calor isostérico de productos extruidos enriquecidos con proteínas a base de maíz y mijo”, **(Toshkov et al., 2020)** en su investigación denominada “Termodinámica de la absorción de humedad en semillas de tabaco (*Nicotiana tabacum L.*)” y **(Barati, Zare y Zomorodian, 2016)** en su investigación denominada “Isotermas de absorción de humedad y propiedades termodinámicas de la semilla de cártamo utilizando modelos empíricos y de redes neuronales.”

#### 4.6.2. Efecto de Xe en qst aplicando la ecuación de TSAMI



*Figura 26.* Efecto de Xe en qst para harina de torta de castaña.

En la Figura 26, el valor del calor isostérico de adsorción (qst) se grafica en función de Xe. En esta figura, puede verse que el qst ha disminuido de 11.7631 a 0.2819 kJ/mol, y Xe pasó desde 0.0299 hasta 0.1057 gr H<sub>2</sub>O / gr m.s, la disminución de qst y el aumento de Xe representa que a medida que los sitios disponibles más activos de la superficie del alimento son ocupados, tiende a disminuir el calor isostérico, y así menos sitios activos existen la humedad va aumentando y el qst va disminuyendo, incluso hasta se

presentan valores negativos de  $q_{st}$  lo que significa que hay mayor cantidad de agua ligada (**Pulla Huillca, 2011**). Así mismo el  $q_{st}$  experimental tiene relación con el  $q_{st}$  calculado, aplicando la ecuación de TSAMI se encontró 100.467 kJ / mol y 0.014 (g agua/g m.s), con un valor  $R^2$  de 0.962.

(**Cheng, Zhang y Adhikari, 2020**), evaluaron el calor isostérico de adsorción en su investigación denominada “Adsorción de humedad en pericarpios de abrojo (*Trapa bispinosa Roxb.*): Propiedades termodinámicas y transición vítrea” los valores  $q_{st}$  y  $X_e$  para los datos de adsorción de agua aplicando la ecuación de TSAMI se encontraron 154,66 kJ / mol y 0,0373 (gr H<sub>2</sub>O/gr m.s), con un valor  $R^2$  bastante alto de 0,970. (**Aksil et al., 2019**), en su investigación denominada “Adsorción de agua en polvo de fruta liofilizada de (*Arbutus unedo L.*): Determinación de parámetros termodinámicos” Se puede ver claramente que el  $Q_{st}$  disminuye rápidamente al aumentar el contenido de humedad de equilibrio, de 52,337 a 6,771 KJ/mol a humedades de 0,15 a 0,4 (gr H<sub>2</sub>O/gr m.s).

**Tabla 23.** Valores de  $q_0$ ,  $X_0$  y  $R^2$  ajustados a la ecuación de TSAMI.

| Muestra                    | $q_0$     | $X_0$   | $R^2$   |
|----------------------------|-----------|---------|---------|
| Harina de torta de castaña | 100.46741 | 0.01413 | 0.96218 |

\* Se obtuvo al 95% de confiabilidad

Al construir la ecuación exponencial de TSAMI, se presenta un coeficiente de determinación 0.962 basado en este valor se puede decir que el modelo predice correctamente el valor del calor isostérico del producto estudiado en función de  $X_e$  (humedad en equilibrio)

#### 4.7. Energía de activación (Ea)

La energía de activación es la energía necesaria para unir o romper la primera capa de agua en un alimento, la formación de enlaces de agua versus sólido (adsorción) requiere más energía que la ruptura de tal vínculo (desorción). (Carmona Carmona, 2018) lo define como la pequeña energía que es necesario para que ocurra una reacción química, es decir, el requisito fundamental para que ocurra una reacción. Al aplicar el modelo de Arrhenius, podemos comprender el efecto de la temperatura en la reacción.

Para ver si la temperatura depende de los parámetros del modelo GAB ( $X_m$ ,  $C_{GAB}$  y  $K_{GAB}$ ) se evaluó por medio de la ecuación de Arrhenius. La energía de activación se determinó aplicando la ecuación 14 y trazando así el parámetro de isoterma GAB  $\ln(D)$  frente a  $1/T$  (K<sup>-1</sup>). La Tabla 24 muestra los parámetros de este modelo.

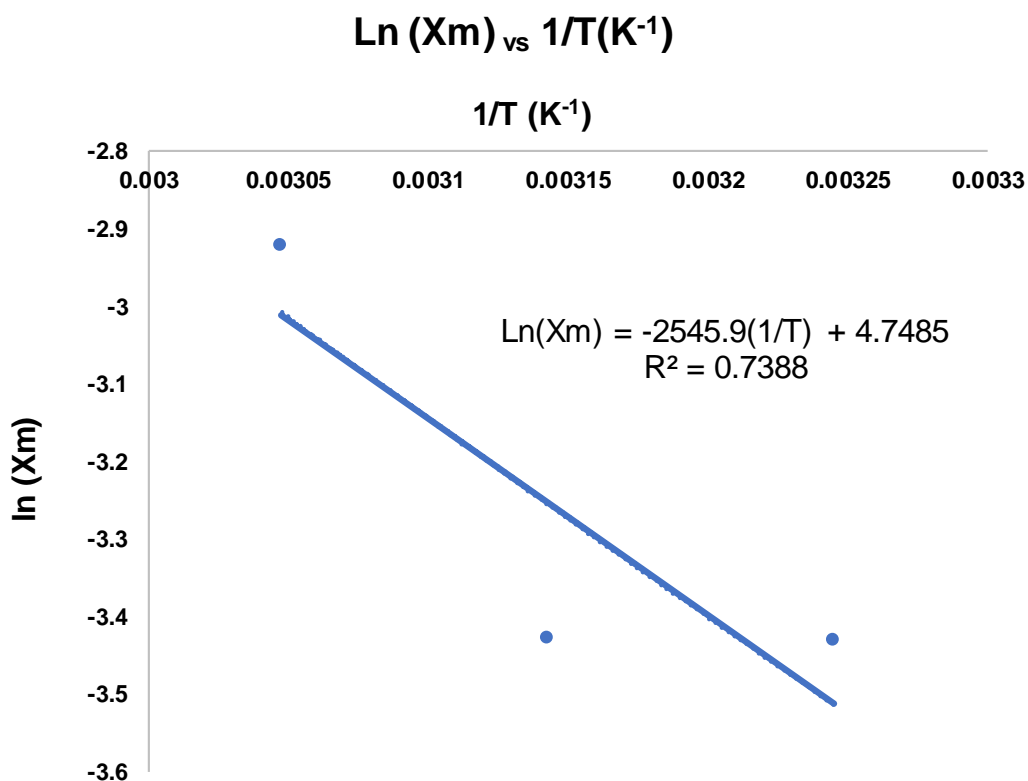
**Tabla 24.** Parámetros del modelo GAB a varias temperaturas.

| MODELO | PARAMETROS | TEMPERATURAS |          |         |
|--------|------------|--------------|----------|---------|
|        |            | 35           | 45       | 55      |
| GAB    | $X_m$      | 0.0324       | 0.0325   | 0.0539  |
|        | $C_{GAB}$  | 227.2266     | 105.6159 | 23.2355 |
|        | $K_{GAB}$  | 0.8530       | 0.7796   | 0.4249  |

##### 4.7.1. Obtención de Ea del parámetro “ $X_m$ ” de GAB

**Tabla 25.** Datos de  $\ln(X_m)$  (humedad de monocapa) versus  $1/T(K^{-1})$  (el inverso de las temperaturas).

| T°C  | $X_m$  | $1/T(K^{-1})$                | $\ln(X_m)$              |
|--|--------|------------------------------|-------------------------|
| 35   | 0.0324 | 0.00325                      | -3.42960                |
| 45   | 0.0325 | 0.00314                      | -3.42652                |
| 55   | 0.0539 | 0.00305                      | -2.92062                |
| <b>R: constante universal de los gases</b> |        | <b>(-)<math>E_a/R</math></b> | <b><math>E_a</math></b> |
| 0.008314                                   |        | -2545.9                      | 21.17kJ/mol             |



*Figura 27:* Grafico de la influencia de Ln (Xm) versus 1/T (K<sup>-1</sup>).

En el grafico se puede apreciar tendencia negativa para la influencia de Ln (Xm) versus 1/T (K<sup>-1</sup>), y R<sup>2</sup> de 0.7388, lo que indica que a medida que ln(Xm) disminuye, va incrementando 1/T.

La energía necesaria para que el agua se adhiera hacia la parte superficial del producto y así pueda formarse una monocapa (Xm) es de 21.167 kJ/mol a 35°C, 45°C y 55°C. Es posible que esta cantidad de energía de activación sea debido a las proteínas existentes en la harina de torta de castaña y que posee grandes cantidades de grupos activos que adsorben humedad.

**(Huaman Yuca, 2016)** en su tesis de Isotermas de Adsorción de Harina de Castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K) obtuvo energía de activación de **12,0163 kJ/mol**, para el **parámetro Xm**, para un intervalo de temperatura de 30°C a 50°C, este resultado es similar a la Ea obtenido en la presente investigación.

#### 4.7.2. Obtención de Ea de del parámetro “C” de GAB

Tabla 26. Datos de  $\ln(C)$  (parámetro “C”) versus  $1/T(K-1)$  (el inverso de las temperaturas).

| T°C  | C        | 1/T(K-1)       | ln(C)       |
|--|----------|----------------|-------------|
| 35   | 227.2266 | 0.00325        | 5.42595     |
| 45   | 105.6159 | 0.00314        | 4.65981     |
| 55   | 23.2355  | 0.00305        | 3.14568     |
| <b>R: constante universal de los gases</b> |          | <b>(-)Ea/R</b> | <b>Ea</b>   |
| 0.008314                                   |          | 11486          | 95.50kJ/mol |

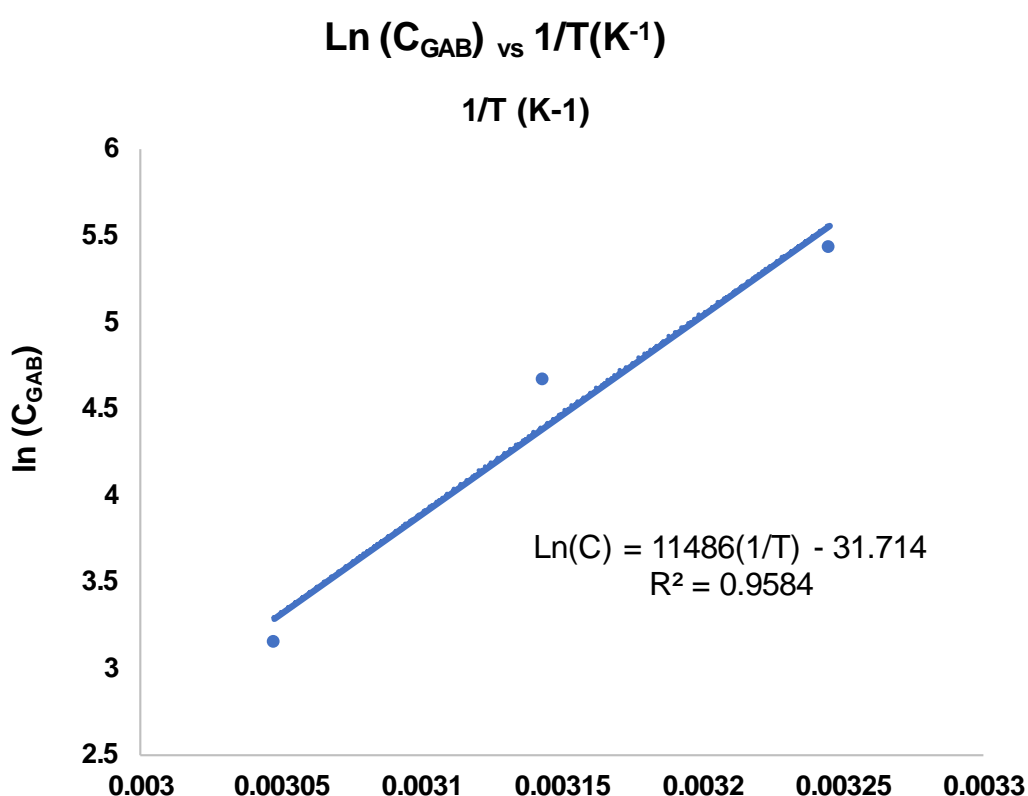


Figura 28. Gráfico de la influencia de  $\ln(C)$  versus  $1/T(K-1)$ .

En la figura 28, se observa que el parámetro  $C_{GAB}$ , depende de la temperatura, realizando el análisis de los valores de  $\ln(C)$  se linealiza con la ecuación de  $\ln(C) = 11486(1/T) - 31.714$  con un  $R^2$  de 0.9584, lo que significa que existe buena relación, en cuanto a la ecuación de  $\ln(C)$  se afirma que la pendiente es positiva y el  $\ln(C)$  es dependiente del inverso de la temperatura ( $1/T$ ), ya que conforme se incrementa el  $\ln(C)$  aumenta ( $1/T$ ).

En la figura 28 también se aprecia que el parámetro C muestra relación con la energía de la humedad adsorbida a la monocapa y la entalpía que es el calor adsorbido por la harina de torta de castaña, esto va de la mano con la energía de activación que obtuvo el valor de 95.495 kJ/mol este valor es mayor a 1, lo que indica que se trata de un producto altamente higroscópico.

(Huaman Yuca, 2016) en su tesis de Isotermas de Adsorción de Harina de Castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K) obtuvo energía de activación de **36.634 kJ/mol**, para el **parámetro C<sub>GAB</sub>**, para un intervalo de temperatura de 30°C a 50°C, este resultado es similar a la Ea obtenido en la presente investigación.

#### 4.7.3. Obtención de Ea de del parámetro “K” de GAB

**Tabla 27.** Datos de Ln (K) (parámetro “K”) versus 1/T(K<sup>-1</sup>) (el inverso de las temperaturas).

| T°C  | K      | 1/T(K <sup>-1</sup> ) | ln(K)       |
|--|--------|-----------------------|-------------|
| 35   | 0.8530 | 0.00325               | -0.15900    |
| 45   | 0.7796 | 0.00314               | -0.24897    |
| 55   | 0.4249 | 0.00305               | -0.85590    |
| <b>R: constante universal de los gases</b> |        | <b>(-)Ea/R</b>        | <b>Ea</b>   |
| 0.008314                                   |        | 3495                  | 29.06kJ/mol |

#### Ln (K<sub>GAB</sub>) vs 1/T(K<sup>-1</sup>)

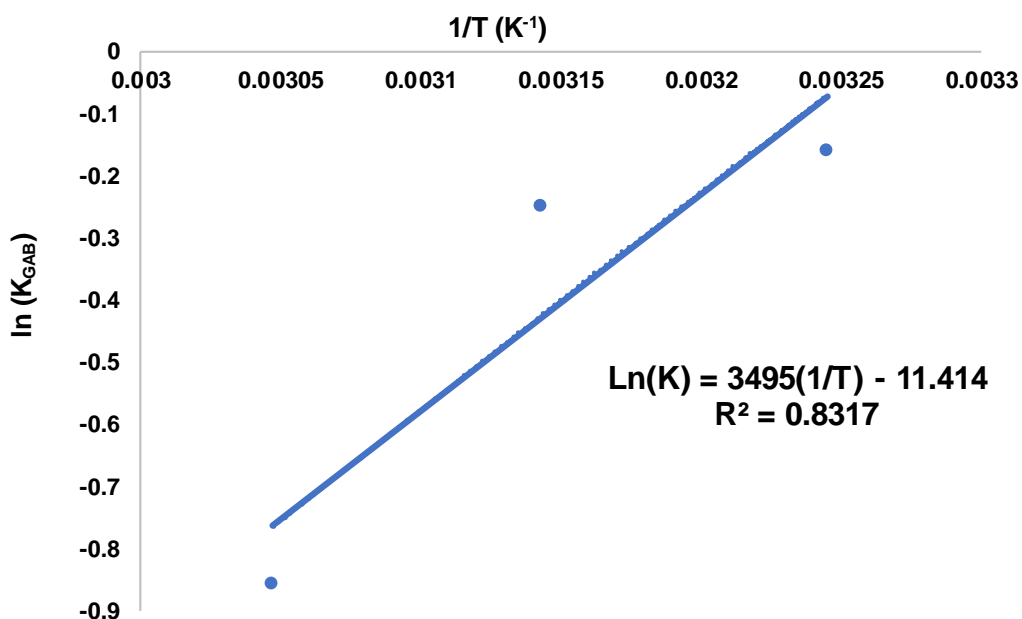


Figura 29. Gráfico de la influencia de Ln (K) versus 1/T (K<sup>-1</sup>).



El parámetro K del modelo de GAB brinda medidas para interacciones de las moléculas de agua de la multicapa con el adsorbente, su valor esta en la energía de las moléculas de la monocapa y el agua líquida, realizando el análisis de los valores de  $\ln(K)$  se linealiza con la ecuación de  $\ln(K) = 3495(1/T) - 11.414$  con un  $R^2$  de 0.8317, concluyendo que existe buena relación, en cuanto a la ecuación de  $\ln(K)$  se afirma que la pendiente es positiva y el  $\ln(K)$  es dependiente del inverso de la temperatura ( $1/T$ ), ya que conforme se incrementa el  $\ln(K)$  aumenta ( $1/T$ ).

**(Pascual-Pineda et al., 2017)**, indican que los valores de K para los tres productos que investigaron: polvo de sacarosa y calcio secado por aspersion, polvo de piña secado en lecho vibrofluidizado y capsulas de alginato y zeolita con oleorresina de paprika, estuvieron en el intervalo de 0.876 a 1.057, además indica, cuando  $K = 1$  las moléculas de agua en la multicapa se comportan como agua pura, las cuales no tienen interacción alguna con la superficie. En la Tabla 27 de la presente investigación se observa que los valores de K fueron inferiores a la unidad, lo que muestra que existieron interacciones energéticas entre las moléculas de agua de la multicapa con la superficie del alimento.

**(Huaman Yuca, 2016)** en su tesis de Isotermas de Adsorción de Harina de Castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K) obtuvo energía de activación de **-5.6722 kJ/mol**, para el **parámetro  $K_{GAB}$** , para un intervalo de temperatura de 30°C a 50°C, este resultado es similar a la  $E_a$  obtenido en la presente investigación.

## CONCLUSIONES

- A.** Las isothermas presentaron comportamiento del tipo II para las temperaturas estudiadas, tiene una curva de característica “S” conocida como sigmoidea, la relación adsorbente-adsorbato son débiles, para 35°C, 45°C y 55°C. Este comportamiento es clásico en alimentos con elevado contenido de proteínas.
- B.** La humedad de equilibrio ( $X_e$ ) aumentó de: 2.86% a 13.18% para 35°C; 3.05% a 10.58% para 45°C; y 3.07% a 7.95% para 55°C, la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) es proporcional de manera directa a la actividad de agua ( $a_w$ ), y proporcional inversamente al crecimiento de la temperatura, mostrando lo higroscópico de las muestras. El decrecimiento del contenido de agua de equilibrio con el aumento de temperatura está relacionado con el cambio de energía del sistema, lo cual sugiere que el crecimiento de temperatura disminuye la estabilidad termodinámica de las moléculas de agua, que es de similar comportamiento a la mayor parte de los productos agrícolas.
- C.** Según los límites estadísticos, los modelos que presentaron un ajuste adecuado a los datos obtenidos en la parte experimental fueron GAB y Oswin. El promedio de  $R^2$  del modelo de GAB ha sido de 0.9571 y el promedio del error relativo porcentual de 6.8695%, la temperatura que se acomoda mejor al modelo es de 45°C, debido a que muestra un  $R^2$  de 0.9848 y error relativo porcentual de 4.6077%. El modelo Oswin también se ajusta a los datos obtenidos en la parte experimental, presentando promedios de  $R^2$  de 0.9368 y para el error relativo porcentual de 8.0127%, la temperatura que se acomoda mejor al modelo es de 45°C, debido a que muestra un  $R^2$  de 0.9814 y error relativo porcentual de 5.2314%.
- D.** En cuanto a las condiciones adecuadas de humedad y temperatura para almacenar y lograr que sea estable el producto estudiado es, a humedades inferiores a 6.67% y a HR del ambiente inferiores al 60%, para 35°C, 45°C y 55°C. Este comportamiento sugiere que un ligero aumento en la HR del ambiente superior al 60% y humedad superior al 6.67%, podría ser afectada la calidad de la harina de torta de castaña en los lugares de almacenamiento, de esta forma el producto requerirá mayores cuidados.

- E.** La humedad de monocapa de GAB es dependiente a la temperatura, reduciendo desde (0.0539-0.0324) gr H<sub>2</sub>O/gr m.s. para 55°C, 45°C y 35°C. Del mismo modo, el valor de “**K**” del modelo de GAB, depende de la temperatura formándose así una línea negativa y reduciendo de 0.8530 a 0.4249 para las mismas temperaturas, sus valores fueron inferiores a la unidad, lo que muestra que existieron interacciones energéticas entre las moléculas de agua de la multicapa con la superficie del alimento. Por otro lado, el valor de “**C**” del modelo de GAB es superior a 1, esto indica que la harina de torta de castaña es altamente higroscópico, es por ello que puede sufrir deterioro y ser atacado por microbios, siempre en cuando se almacene a humedades ambientales superiores al 60%.
- F.** Los valores del qst reducen conforme va aumentando la humedad de equilibrio de la harina de torta de castaña, desde 11.7631 hasta -0.2819 kJ/mol a humedades de 0.0299 hasta 0.1057 gr H<sub>2</sub>O/gr masa seca, a 35, 45 y 55°C. Del mismo modo para calcular el calor isostérico de adsorción, se verificó la validez de la ecuación planteada por (Tsami et al., 2007), obteniéndose un buen ajuste del  $R^2= 0.96218$ .
- G.** Existe efecto en la temperatura para el modelo de GAB, esto se determinó con la “**Ea**”, resultando valores de 21.167 kJ/mol para “**Xm**” (humedad de la monocapa), 95.495 kJ/mol para “**C**” y 29.057 kJ/mol para “**K**”, observando evidentemente el efecto de la temperatura en la humedad de monocapa con tendencia negativa, “**C**” y “**K**” con tendencias positivas.

## SUGERENCIAS

- a. Determinar el tiempo de vida útil de la harina de torta de castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) a 6% de humedad del producto y a humedades relativas inferiores al 60%
- b. Evaluar las isothermas de desorción de la castaña pelada a 50°C, 60°C, 70°C y 80°C, utilizar castañas partidas para luego extraer su aceite, obtener harina de torta de castaña, y para determinar los parámetros óptimos para el deshidratado de este alimento (% de humedad y energía de activación).
- c. Evaluar las isothermas de adsorción para la harina de torta de castaña tomando como variables el tamaño de partículas, para ello se recomienda utilizar tamices de diferentes medidas.
- d. Evaluar las isothermas de adsorción para este mismo producto con otros modelos matemáticos.
- e. Evaluar las isothermas de adsorción para este mismo producto tomado en cuenta el método de secado por secador solar para el producto a evaluar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aksil, T. *et al.* (2019) «Adsorción de agua en polvo de fruta liofilizada de *Arbutus unedo* L.: Determinación de parámetros termodinámicos.», *Microchemical Journal*. Elsevier B.V, 145, pp. 35-41. doi: 10.1016/j.microc.2018.10.012.
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. y Magee, T. (2002) «Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review», *Food and Bioprocess Technology: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C*. Institution of Chemical Engineers, 80(2), pp. 118-128. doi: 10.1205/09603080252938753.
- Asociación para la Conservación de la Cuenca Amazónica (2010) *Manual para la Elaboración del Plan General de Manejo para el aprovechamiento de castaña *Bertholletia excelsa**. Lima-Perú.
- Barati, M., Zare, D. y Zomorodian, A. (2016) «Isotermas de absorción de humedad y propiedades termodinámicas de la semilla de cártamo utilizando modelos empíricos y de redes neuronales.», *Journal of Food Measurement and Characterization*. Springer Verlag, 10(2), pp. 236-246. doi: 10.1007/s11694-015-9298-4.
- Barbosa Cánovas, G. V. (2000) *Deshidratación de alimentos*. Editorial. España: Editorial Acribia, S.A. Disponible en: [https://www.editorialacribia.com/libro/deshidratacion-de-alimentos\\_54064/](https://www.editorialacribia.com/libro/deshidratacion-de-alimentos_54064/).
- Barbosa, P. de S. *et al.* (2018) «Caracterización de aminoácidos en *Bertholletia excelsa*: viabilidad nutricional para la incorporación en la dieta de cachorros de pescado hombre amazónico en cautividad», *Acta Biomédica Brasiliensis*, 9(1), p. 1. doi: 10.18571/acbm.151.
- Barretto, T. L. *et al.* (2019) «Water sorption isotherms of cooked hams as affected by temperature and chemical composition», *Food Science and Technology*. Sociedade Brasileira de Ciencia e Tecnologia de Alimentos, SBCTA, 39(3), pp. 677-683. doi: 10.1590/fst.04218.
- Bazardeh, M. E. y Esmaili, M. (2014) «Sorption isotherm and state diagram in evaluating storage stability for sultana raisins», *Journal of Stored Products Research*. Elsevier Ltd, 59, pp. 140-145. doi: 10.1016/j.jspr.2014.07.001.
- Brennan, J. G. (2008) *Manual del procesado de los alimentos*. España:

Editorial Acribia, S.A. Disponible en:  
[https://www.editorialacribia.com/libro/manual-del-procesado-de-los-alimentos\\_54110/](https://www.editorialacribia.com/libro/manual-del-procesado-de-los-alimentos_54110/) (Accedido: 6 de febrero de 2021).

De Burgh, J. M. y Foster, S. J. (2016) «Influence of temperature on water vapour sorption isotherms and kinetics of hardened cement paste and concrete», *Elsevier-ScienceDirect*. Elsevier Ltd, 92, pp. 37-55. doi: 10.1016/j.cemconres.2016.11.006.

Carmona Carmona, E. A. (2018) *Determinación de la energía de activación en la descomposición de una manzana (royal gala) magullada*. Machala-Ecuador. Disponible en:  
[http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12140/1/CARMONA\\_CARMONA\\_EUGENIO\\_ALFREDO.pdf](http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12140/1/CARMONA_CARMONA_EUGENIO_ALFREDO.pdf) (Accedido: 9 de mayo de 2021).

Carvalho Lago, C. y Zapata Noreña, C. P. (2015) «Thermodynamic analysis of sorption isotherms of dehydrated yacon (*Smallanthus sonchifolius*) bagasse», *Food Bioscience*. Elsevier Ltd, 12, pp. 26-33. doi: 10.1016/j.fbio.2015.07.001.

Casp Vanaclocha, A. y Abril Requena, J. (2003) *Procesos de conservación de alimentos-tecnología alimentos y conservación*. Segunda ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. Disponible en:  
<http://www.amvediciones.com/pca.htm> (Accedido: 6 de febrero de 2021).

Chavez Tarazona, A. Y. (2017) *Evaluación de galletas enriquecidas con harina (*Bertholletia excelsa*) mediante nuevos métodos sensoriales: CATA, mapeo de preferencia y JAR*. Universidad Peruana Unión. Disponible en:  
[https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/903/Ana\\_Chavez\\_Tesis\\_Bachiller\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/903/Ana_Chavez_Tesis_Bachiller_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Cheftel, C. J. *et al.* (2000) *Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos*. España: Editorial Acribia, S.A. doi: 9788420005126.

Chirinos Ochoa, N. (2015) *Efecto de dietas extruidas en base a torta de castaña (*Bertholletia Excelsa*, H.B.K.) y fruto de camambú (*theobroma bicolor*), sobre los índices de crecimiento y zootécnicos en el cultivo de pacos juveniles (*piaractus brachypomus*)*. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Disponible en:  
<http://repositorio.unamad.edu.pe/bitstream/handle/UNAMAD/68/004-2-1->

- 015.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Accedido: 7 de febrero de 2021).
- Choque-Quispe, D. *et al.* (2019) «Evaluación de las isothermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*)», *Revista ION*, 31(2), pp. 67-81. doi: 10.18273/revion.v31n2-2018005.
- Choque Q., D., Cáceres H., N. B. y Solano R., A. M. (2009) *Evaluación de las isothermas de adsorción del maíz morado (Zea mays L.): Calor Isostérico y Energía de Activación*. Cusco- Perú: Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC. doi: 9783659704000.
- Comaposada, J., Gou, P. y Arnau, J. (2015) «The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms», *Meat Science*, 3(55), pp. 291-295.
- Comité Técnico Multisectorial de la Castaña - CTMC (2006) «La cadena de valor de la castaña amazónica del Perú», *Candela Perú*.
- Cruz Hilacondo, Wilbert; Cuellar Bautista, José Eloy; Ramos León, H. M. (2019) *Manual de protocolos para el estudio de diversidad genética en especies forestales nativa: Tornillo (Cedrelinga cateniformis (Ducke) Ducke), Capirona (Callycophyllum spruceanum Benth.), Shihuahuaco (Dipteryx sp.), Ishpingo (Amburana sp.) y Castaña (Bertho*. Primera Ed, *Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA*. Primera Ed. Lima – Perú. Disponible en: <https://elenfermerodependiente.files.wordpress.com/2015/02/manual-de-heridas-del-hospital-universitario-de-m-stoles.pdf>.
- Da-Silva Pena, R., Mendonça, N. B. y Costa de Almeida, M. D. (2010) «Comportamiento higroscópico del polvo de Asai», *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 12(2), pp. 153-161.
- Diario Economía y Gestión (2018) *Perú, segundo exportador de castañas a EE.UU., le envía el 60% de su producción*. NOTICIAS GESTIÓN. Disponible en: <https://gestion.pe/economia/peru-segundo-exportador-castanas-ee-uu-le-envia-60-produccion-235079-noticia/> (Accedido: 12 de septiembre de 2021).
- Eluan da SILVA, A., Helena Meller da SILVA, L. y da Silva PENA, R. (2008) «Comportamento higroscópico do açaí e cupuaçu em pó Hygroscopic behavior of açaí and cupuaçu powders», *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28(4), pp. 895-901.

Ferreira, C. D. y Pena, R. S. (2003) «Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*)», *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. FapUNIFESP (SciELO), 23(2), pp. 251-255. doi: 10.1590/s0101-20612003000200025.

Gabas, A. L. *et al.* (2009) «Propiedades termodinámicas de sorción de agua de la pulpa de lulo en polvo con encapsulantes», *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. FapUNIFESP (SciELO), 29(4), pp. 911-918. doi: 10.1590/s0101-20612009000400032.

Gavidia Rodrigues, A. B. (2015) «Efecto de la temperatura en isothermas de absorción de harina de maca (*lepidium meyenii*)». Disponible en: <http://www.dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3396/GAVIDIA RODRIGUEZ ALICIA BEATRIZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Gomes Moreira, S. (2015) *Caracterização química dos compostos bioativos e obtenção de micropartículas a partir da torta da prensagem da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*)*. Rio de Janeiro - Brasil. Disponible en: [https://ppgcal.iq.ufrj.br/wp-content/uploads/2017/06/Suellen\\_Gomes\\_Tese.pdf](https://ppgcal.iq.ufrj.br/wp-content/uploads/2017/06/Suellen_Gomes_Tese.pdf) (Accedido: 26 de mayo de 2021).

Goneli, A. L. D. *et al.* (2016) «Moisture sorption isotherms of castor beans. Part 2: Thermodynamic properties», *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(8), pp. 757-762. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n8p757-762.

Guevara Paredes, C. J. (2015) *Efecto de la temperatura en isothermas de adsorción de quinua (*Chenopodium quinoa willd*) en hojuelas*. Universidad Nacional de Trujillo. Disponible en: <http://www.dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3397/GUEVARA PAREDES CIRO JAVIER.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Gutierrez Balarezo, J. (2014) *Determinacion de las isothermas de adsorción de la harina de platano verde (*Musa paradisiaca l.*) en puerto Maldonado*. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

Guzmán-Hincapié, J. C. y Zapata, J. E. (2018) «Propiedades Termodinámicas e Isothermas de Sorción de Sales con Interés Alimentario», *Informacion Tecnologica*. Centro de Informacion Tecnologica, 29(3), pp. 105-120. doi:



10.4067/S0718-07642018000300105.

Huaman Yuca, B. Y. (2016) *Isotermas de adsorción de la harina de castaña (Bertholletia excelsa H.B.K) en la región de Madre de Dios*. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Disponible en: <http://repositorio.unamad.edu.pe/bitstream/handle/UNAMAD/326/004-2-1-029.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Humboldt, F. W. H. A. von y Bonpland, A.-J.-A. (1817) *Plantas equinociales, recolectadas en México en la isla de Cuba, en las provincias de Caracas, Cumaná y Barcelona, en los Andes de Nueva Granada, Quito y Perú, y en las riberas del Río Negro, el Orinoco y el Río Amazonas*. Paris-Tubingue. Disponible en: <https://bibdigital.rjb.csic.es/records/item/14416-planta-e-aequinociales-tome-second>.

Jimenez Aguirre, N. A. y Duque De La Cruz, C. E. (2018) “*Efecto de la sustitución parcial de la harina de trigo (Triticum aestivum L.) por harina de castaña (Bertholletia excelsa) en el comportamiento reológico de su masa para la aplicación en la industria de la panificación*”. Universidad Nacional del Santa. Disponible en: <http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/3172/48625.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Labuza, T., Kaanane, A. y Chen, J. (1985) «Efecto de la temperatura sobre las isotermas de absorción de humedad y el cambio en la actividad del agua de dos alimentos deshidratados», *Revista de ciencia alimentaria*, 50, pp. 385-392. Disponible en: <https://experts.umn.edu/en/publications/effect-of-temperature-on-the-moisture-sorption-isotherms-and-wate>.

Larrea-Alcázar, D. et al. (2018) «El árbol de la castaña (*Bertholletia excelsa* Bonpl., Lecythidaceae) en Bolivia: distribución geográfica e impacto de la deforestación 2010-2015», *Ecología en Bolivia*, 53(1), pp. 16-30. Disponible en: [http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v53n1/v53n1\\_a03.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v53n1/v53n1_a03.pdf).

Leonardo Betiol, L. F. et al. (2020) «Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham», *LWT*. Academic Press, 123. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109112.

Lozano, G. et al. (2016) *Introducción a la termodinámica y a las enzimas*. Antioquia. Disponible en: <https://aprenderly.com/doc/1469232/introducción-a->

- la-termodinámica-y-a-las-enzimas-archivo (Accedido: 7 de febrero de 2021).
- Martín Santos, J. A. (2015) *Cinética de sorción de humedad en productos de molinería. Obtención acelerada de datos y caracterización matemática*. Universidad de Córdoba.
- Masats, J. (2019) *Cultivo de las nueces del Brasil – Botanical-online, equipo de botanical-online SL*. Disponible en: <https://www.botanical-online.com/cultivo/nueces-brasil-como-plantar-cuidados> (Accedido: 31 de enero de 2021).
- Medina, M. P. *et al.* (2015) «Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco», *Tecnología Química*, XXXV(1), pp. 73-91. doi: 10.1590/2224-6185.2015.1.
- Ministerio del Ambiente - MINAM (2014) *La Castaña Amazónica regalo de la biodiversidad, Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural*. Lima, Perú: Editorial Imprenta Edugraf.
- Miró Agurto, J. (2018) *Proceso productivo de la castaña Bertholletia excelsa HBK en Madre de Dios*. Puerto Maldonado. Disponible en: [http://www.iiap.gob.pe/Archivos/Publicaciones/Publicacion\\_3562999.pdf](http://www.iiap.gob.pe/Archivos/Publicaciones/Publicacion_3562999.pdf).
- Modesto dos Santos, A. (2017) «Las propiedades de las nueces de Brasil: sus beneficios alcanzan más que el sabor», *Centro Universitário Leonardo Da Vinci - Uniasselvi*, pp. 1-16. Disponible en: <https://www.recantodasletras.com.br/artigos-de-ciencia-e-tecnologia/6056290>.
- Morales, S. F. *et al.* (2019) «Generación automática de estructuras repetitivas y selectivas en java». Celaya, Guanajuato, México, pp. 1023-1188. Disponible en: <https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/5ff8854fe353694125425bd8/1610122646450/Tomo+07+-+Diseminación+de+la+investigación+en+la+educación+superior+-+Celaya+2019.pdf>.
- Mosquera Pinto, N., de la Vega, J. C. y Cañarejo, M. (2016) «Utilización del método de conservación bajo atmósferas controladas en frutas y hortalizas», *Agroindustrial Science*, 2, pp. 231-238. doi: 10.17268/agroind.science.2016.02.08.

Ovalle Focori, J. (2015) *Evaluación de isotermas de adsorción en harina de pijuayo (Bactris gasipaes)*, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios - Unamad. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Disponible en: <http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/UNAMAD/69> (Accedido: 8 de febrero de 2021).

Pascual-Pineda, L. A. *et al.* (2017) «Predicción de condiciones de almacenamiento de alimentos deshidratados a partir de una isoterma de adsorción de vapor de agua», *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), pp. 207-220. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/620/62049878020.pdf>.

Pulla Huillca, P. V. (2011) *Determinación de las isotermas de adsorción del ají (Caspicum annuum) seco*. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Disponible en: <http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/UNAMAD/61> (Accedido: 7 de febrero de 2021).

Quispe Pucho, F. (2017) *Análisis fisicoquímico, organoléptico y de antioxidantes totales en una bebida a base de almendra amazónica (Bertholletia excelsa)*. Universidad Mayor de San Andrés Facultad de Ciencias Puras y Naturales Carrera de Ciencias Químicas. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/18217/M-313.pdf?sequence=1>.

Ramírez-Miranda, M. *et al.* (2014) «Determinación de las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz Nixtamalizada», *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(1), pp. 165-178. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/620/62031166013.pdf>.

Ramírez Colorado, Y. N. (2018) *Efecto de las características de sorción de humedad y temperatura de transición vítrea sobre la estabilidad fisicoquímica de un ingrediente funcional a base de la oleoresina de chile habanero*. Universidad Veracruzana. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/49250/RamirezColoradoYoltzin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Reyna Ramos, I. (2020) *La castaña, el verdadero oro de Madre de Dios*, prensa madre de dios. Disponible en: <https://www.madrededios.com.pe/de-interes/articulos-de-interes/item/48-la-castana-el-verdadero-oro-de-madre->

de-dios.html (Accedido: 7 de febrero de 2021).

Rizvi, S. (2005) «Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration», en *Engineering properties of foods*. Taylor & Francis, Boca Ratón, pp. 259-346. doi: 10.1201/9781420028805.ch7.

Sahu, C., Patel, S. y Khokhar, D. (2021) «Comportamiento de sorción y calor isostérico de productos extruidos enriquecidos con proteínas a base de maíz y mijo», *Heliyon*. Elsevier BV, 7(4), p. e06742. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06742.

Stockler-Pinto, M. B. *et al.* (2015) «Efecto de la suplementación de selenio a través de la nuez de Brasil (*Bertholletia excelsa*, HBK) en los niveles de hormonas tiroideas en pacientes de hemodiálisis: Un estudio piloto», *Nutricion Hospitalaria*, 32(4), pp. 1808-1812. doi: 10.3305/nh.2015.32.4.9384.

Telis-Romero, J. *et al.* (2005) «Enthalpy-entropy compensation based on isotherms of mango», *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 25(2), pp. 297-303. doi: 10.1590/s0101-20612005000200020.

Thommes, M. *et al.* (2015) «Fisisorción de gases, con especial referencia a la evaluación del área de superficie y la distribución del tamaño de los poros (Informe técnico de la IUPAC)», *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), pp. 1051-1069. doi: 10.1515/pac-2014-1117.

Tsami, E. *et al.* (2007) «Heat of sorption of water in dried fruits», *International Journal of Food Science y Technology*. John Wiley & Sons, Ltd, 25(3), pp. 350-359. doi: 10.1111/j.1365-2621.1990.tb01092.x.

Universidad Nacional Agraria La Molina (2014) *La Molina Calidad Total Laboratorios-UNALM, La Molina Calidad Total*. Disponible en: <http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal/>.

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC (2020) *Escuela Profesional de Química- Laboratorio de Química*. Disponible en: <http://qu.unsaac.edu.pe/home/>.

Valeriano Tonon, R. (2009) *Secagem por atomização do suco de açaí: Influência das variáveis de processo, qualidade e estabilidade do produto*. Universidade Estadual de Campinas.

Vega Gálvez, A., Lara Aravena, E. y Lemus Mondaca, R. (2006) «Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.)», *Ciência e Tecnologia de*

*Alimentos*, 26(4), pp. 821-827. doi: 10.1590/S0101-20612006000400017.

Villacorta Valdivia, L. D. (2021) "*Efecto del Bioestimulante Multialgas en la Producción de clones de Castaña (Bertholletia Excelsa Humb. & Bonpl.) a partir de estacas adultas en Cámara de Subirrigación, Pucallpa*". Universidad Nacional de Ucayali. Disponible en: [http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4851/UNU\\_FORESTAL\\_2021\\_T\\_LEX-VILLACORTA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4851/UNU_FORESTAL_2021_T_LEX-VILLACORTA.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Wolf, W., Spiess, W. E. L. y Jung, G. (1985) «Standardization of Isotherm Measurements (Cost-Project 90 and 90 BIS)», en *Properties of Water in Foods*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 661-679. doi: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-5103-7\\_40](https://doi.org/10.1007/978-94-009-5103-7_40).

# ANEXOS

## ANEXO 1: Matriz de Consistencia

“EVALUACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LA HARINA DE TORTA DE CASTAÑA (*Bertholletia Excelsa*, H.B.K.)”

Por: David Arocutipa Coaquira Y Christopher Delgado Solis.

| PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN   | OBJETIVOS  | HIPÓTESIS  | VARIABLES E INDICADORES   | METODOLOGÍA  | POBLACION Y MUESTRA   |
|---|--|--|---|--|---|
| <p>-La harina de torta de castaña es altamente higroscópica, es un alimento rico en proteínas 37.27%.<br/>-es sensible a condiciones no adecuadas y que conllevan a sufrir reacciones de deterioro<br/>-es necesario realizar una investigación que contribuya en su almacenamiento</p> | <p><b><u>Objetivo general</u></b><br/>Evaluar las isotermas de adsorción para que contribuya con las condiciones adecuadas de almacenamiento.</p> <p><b><u>Objetivos específicos</u></b><br/>-Obtener los datos experimentales del contenido de humedad de equilibrio (Xe).<br/>-Modelar</p> | <p><b><u>Hipótesis nula:</u></b><br/>H0: La evaluación de las isotermas de adsorción no contribuirá con las condiciones adecuadas de almacenamiento de harina de torta de castaña (<i>Bertholletia Excelsa</i>, H.B.K.).</p> <p><b><u>Hipótesis alterna:</u></b><br/>Ha: La evaluación de las isotermas de adsorción</p> | <p><b><u>Variables Independientes:</u></b><br/>Temperaturas (35, 45 y 55) °C.<br/>Humedad relativa (9.79 a 88.80) %.</p> <p><b><u>Variables dependientes:</u></b><br/>Humedad de equilibrio (Xe) (g agua/g m.s.)<br/>Humedad de la monocapa del producto (Xm) (g agua/g m.s.)</p> | <p><b><u>Tipo de estudio</u></b><br/>Es un “estudio correlacional”, el cual tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más variables en una muestra.</p> <p><b><u>Diseño del estudio</u></b><br/>Es un “estudio de campo, analítico y experimental”. Por lo tanto, a través de la parte</p> | <p><b><u>Población</u></b><br/>-se obtuvo castaña pelada de tercera (broken), proveniente de la Asociación “ASCART”.</p> <p><b><u>Muestra</u></b><br/>La muestra a utilizar fue de 1gr de harina de torta de castaña por 3 repeticiones para cada solución salina. En la presente</p> |

|   |  |   |  |   |  |
|---|--|---|--|---|--|
| <p>adecuado.</p> <p><b>Formulación del problema</b></p> <p>¿La evaluación de las isothermas de adsorción contribuirá con las condiciones adecuadas de almacenamiento de harina de torta de castaña (<i>Bertholletia Excelsa</i>, H.B.K.)?</p> | <p>matemáticamente las isothermas de adsorción</p> <p>-Determinar el contenido de humedad de la monocapa (<math>X_m</math>).</p> <p>-Determinar el calor isostérico de adsorción.</p> <p>-Determinar la energía de activación.</p> | <p>contribuirá con las condiciones adecuadas de almacenamiento de harina de torta de castaña (<i>Bertholletia Excelsa</i>, H.B.K.).</p> |  | <p>experimental se pretende llegar a la causa del fenómeno. La esencia es someter el objeto de estudio a la influencia de ciertas variables en condiciones controladas y conocidas.</p> | <p>investigación se utilizó 9 frascos con diferentes sales que contienen diferentes humedades relativas (HR%).</p> |
|---|--|---|--|---|--|



## ANEXO 2: Instrumento

### Operacionalización de variables

| TIPO DE VARIABLE                | DIMENSIONES                              | INDICADOR    | UNIDAD DE MEDIDA |
|---------------------------------|--|--------------|------------------|
| <b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b> | Temperatura                              | 35, 45 y 55  | °C               |
|                                 | Humedad relativa                         | 9.79 a 88.80 | %                |
| <b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>   | Humedad de equilibrio (Xe)               | ninguno      | g agua/g m.s.    |
|                                 | Humedad de la monocapa del producto (Xm) | ninguno      | g agua/g m.s.    |

### ANEXO 3: Fotografías del trabajo de investigación



*Figura 30.* Molienda de harina de torta de castaña en molino industrial



*Figura 31.* Torta de castaña extraído de la prensa y sin aceite



*Figura 32.* Harina de torta de castaña secándose en la estufa



Figura 33. Muestra de harina de torta de castaña para la determinación de humedad



Figura 34. Envasado de harina de torta de castaña en bolsas de polipropileno





*Figura 35.* Muestra de harina de torta de castaña en balanza analítica para determinación de humedad.



*Figura 36.* muestra de harina de torta de castaña sometida a diferentes temperaturas 35°C, 45°C y 55°C en el equipo de refrigeradora-incubadora.



*Figura 37.* Sales en frascos para la evaluación de isothermas de adsorción.



*Figura 38.* Almacenamiento de la muestra refrigeradora-incubadora.





*Figura 39.* muestra de harina de torta de castaña para la determinación de humedad en campana desecadora.



Figura 40. Determinación de humedad de muestras de harina de torta de castaña en el equipo de METTLER TOLEDO.

## ANEXO 4: Cálculo de los parámetros para cada modelo mediante el software STATISTICA versión 10.0.228.8

### PARAMETROS OBTENIDOS, DATOS AJUSTADOS Y R<sup>2</sup> DEL MODELO DE GAB A 35°C

| Model is: $x_e = (x_m * c * k * a_w) / ((1 - (k * a_w)) * (1 - k * a_w + c * k * a_w))$ (Spreadsheet1) |          |                |                   |          |                   |                   |
|--|----------|----------------|-------------------|----------|-------------------|-------------------|
| Dep. Var. : $x_e$  |          |                |                   |          |                   |                   |
| Level of confidence: 95.0% ( alpha=0.050)  |          |                |                   |          |                   |                   |
|  | Estimate | Standard error | t-value<br>df = 6 | p-value  | Lo. Conf<br>Limit | Up. Conf<br>Limit |
| xm   | 0.0324   | 0.005          | 6.15779           | 0.000841 | 0.02              | 0.045             |
| c  | 227.2255 | 2101.082       | 0.10815           | 0.917405 | -4913.94          | 5368.387          |
| k  | 0.8530   | 0.053          | 16.06684          | 0.000004 | 0.72              | 0.983             |

| Model is: $x_e = (x_m * c * k * a_w) / ((1 - (k * a_w)) * (1 - k * a_w + c * k * a_w))$ (Spreadsheet1) |          |           |           |  |  |  |
|--|----------|-----------|-----------|--|--|--|
| Dep. Var. : $x_e$  |          |           |           |  |  |  |
|  | Observed | Predicted | Residuals |  |  |  |
| 1  | 0.028600 | 0.034171  | -0.005571 |  |  |  |
| 2  | 0.048300 | 0.038894  | 0.009406  |  |  |  |
| 3  | 0.048300 | 0.043892  | 0.004408  |  |  |  |
| 4  | 0.049600 | 0.051170  | -0.001570 |  |  |  |
| 5  | 0.062300 | 0.057434  | 0.004866  |  |  |  |
| 6  | 0.067500 | 0.069439  | -0.001939 |  |  |  |
| 7  | 0.069200 | 0.088151  | -0.018951 |  |  |  |
| 8  | 0.121100 | 0.107824  | 0.013276  |  |  |  |
| 9  | 0.131800 | 0.133258  | -0.001458 |  |  |  |

Results: Spreadsheet1

Model is:  $x_e = (x_m * c * k * a_w) / ((1 - (k * a_w)) * (1 - k * a_w + c * k * a_w))$   
 Dependent variable:  $x_e$  Independent variables: 1  
 Loss function: least squares  
 Final value: .00070637  
 Proportion of variance accounted for: .92616862 R = .96237655

Quick | Advanced | Residuals | Review

Summary: Parameter estimates  
 Predicted values, Residuals, etc.  
 Iteration history  
 Analysis of Variance  
 Fitted 2D function & observed vals  
 Fitted 3D function & observed vals

Summary  
 Cancel  
 Options  
 By Group

## PARAMETROS OBTENIDOS, DATOS AJUSTADOS Y R<sup>2</sup> DEL MODELO DE GAB A 45°C

| Model is: $xe=(xm*c*k*aw)/((1-(k*aw))*(1-k*aw+c*k*aw))$ (Spreadsheet6) |          |                |                   |          |                   |                   |
|--|----------|----------------|-------------------|----------|-------------------|-------------------|
| Dep. Var. : xe   |          |                |                   |          |                   |                   |
| Level of confidence: 95.0% ( alpha=0.050)                              |          |                |                   |          |                   |                   |
|  | Estimate | Standard error | t-value<br>df = 6 | p-value  | Lo. Conf<br>Limit | Up. Conf<br>Limit |
| xm   | 0.03463  | 0.00319        | 10.86571          | 0.000036 | 0.02683           | 0.04243           |
| c  | 34.08119 | 14.92238       | 2.28390           | 0.062465 | -2.43257          | 70.59495          |
| k  | 0.75690  | 0.03828        | 19.77051          | 0.000001 | 0.66322           | 0.85058           |

| Model is: $xe=(xm*c*k*aw)/((1-(k*aw))*(1-k*aw+c*k*aw))$ |          |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|
| Dep. Var. : xe  |          |           |           |
|   | Observed | Predicted | Residuals |
| 1   | 0.030500 | 0.027863  | 0.002637  |
| 2   | 0.038900 | 0.034886  | 0.004014  |
| 3   | 0.042900 | 0.041205  | 0.001695  |
| 4   | 0.044500 | 0.048390  | -0.003890 |
| 5   | 0.053700 | 0.052938  | 0.000762  |
| 6   | 0.065200 | 0.061345  | 0.003855  |
| 7   | 0.070300 | 0.075041  | -0.004741 |
| 8   | 0.082300 | 0.084617  | -0.002317 |
| 9   | 0.105800 | 0.102846  | 0.002954  |

Results: Spreadsheet6

Model is:  $xe=(xm*c*k*aw)/((1-(k*aw))*(1-k*aw+c*k*aw))$   
 Dependent variable: xe Independent variables: 1  
 Loss function: least squares  
 Final value: .00009308  
 Proportion of variance accounted for: .97981709 R = .9898571

Quick | Advanced | Residuals | Review

Summary: Parameter estimates

Predicted values, Residuals, etc.

Iteration history

Analysis of Variance

Fitted 2D function & observed vals

Fitted 3D function & observed vals

Summary

Cancel

Options

By Group

## PARAMETROS OBTENIDOS, DATOS AJUSTADOS Y R<sup>2</sup> DEL MODELO DE GAB A 55°C

| Model is: $xe=(xm*c*k*aw)/((1-(k*aw))*(1-k*aw+c*k*aw))$ (Spreadsheet6) |          |                |                   |          |                   |                   |
|--|----------|----------------|-------------------|----------|-------------------|-------------------|
| Dep. Var. : xe   |          |                |                   |          |                   |                   |
| Level of confidence: 95.0% ( alpha=0.050)                              |          |                |                   |          |                   |                   |
|  | Estimate | Standard error | t-value<br>df = 6 | p-value  | Lo. Conf<br>Limit | Up. Conf<br>Limit |
| xm   | 0.05386  | 0.008686       | 6.200534          | 0.000811 | 0.032603          | 0.07511           |
| c  | 23.23520 | 6.832733       | 3.400571          | 0.014486 | 6.516102          | 39.95429          |
| k  | 0.42488  | 0.106259       | 3.998533          | 0.007131 | 0.164874          | 0.68489           |

| Model is: $xe=(xm*c*k*aw)/((1-(k*aw))*(1-k*aw+c*k*aw))$ |          |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|
| Dep. Var. : xe  |          |           |           |
|   | Observed | Predicted | Residuals |
| 1   | 0.030700 | 0.028215  | 0.002485  |
| 2   | 0.038600 | 0.038546  | 0.000054  |
| 3   | 0.040200 | 0.047645  | -0.007445 |
| 4   | 0.055700 | 0.054931  | 0.000769  |
| 5   | 0.060500 | 0.057939  | 0.002561  |
| 6   | 0.067400 | 0.062952  | 0.004448  |
| 7   | 0.068300 | 0.070139  | -0.001839 |
| 8   | 0.073000 | 0.073158  | -0.000158 |
| 9   | 0.079500 | 0.080094  | -0.000594 |

Results: Spreadsheet6

Model is:  $xe=(xm*c*k*aw)/((1-(k*aw))*(1-k*aw+c*k*aw))$   
 Dependent variable: xe Independent variables: 1  
 Loss function: least squares  
 Final value: .0000923  
 Proportion of variance accounted for: .96028947 R = .97994361

Quick | Advanced | Residuals | Review

Summary: Parameter estimates

Predicted values, Residuals, etc.

Iteration history

Analysis of Variance

Fitted 2D function & observed vals

Fitted 3D function & observed vals

Summary

Cancel

Options

By Group

**PARAMETROS OBTENIDOS, DATOS AJUSTADOS Y R<sup>2</sup> DEL MODELO DE OSWIN A 35°C**

| Model is: $xe=A*(aw/(1-aw))^B$ (Spreadsheet22) |          |                |                   |          |                |                |
|--|----------|----------------|-------------------|----------|----------------|----------------|
| Dep. Var. : xe                                 |          |                |                   |          |                |                |
| Level of confidence: 95.0% ( alpha=0.050)      |          |                |                   |          |                |                |
|  | Estimate | Standard error | t-value<br>df = 7 | p-value  | Lo. Conf Limit | Up. Conf Limit |
| A  | 0.059865 | 0.004263       | 14.04171          | 0.000002 | 0.049784       | 0.069946       |
| B  | 0.376108 | 0.047763       | 7.87444           | 0.000101 | 0.263166       | 0.489049       |

| Model is: $xe=A*(aw/(1-aw))^B$ (Spreadsheet22) |          |           |           |
|--|----------|-----------|-----------|
| Dep. Var. : xe                                 |          |           |           |
|  | Observed | Predicted | Residuals |
| 1  | 0.028600 | 0.027069  | 0.001531  |
| 2  | 0.048300 | 0.036823  | 0.011477  |
| 3  | 0.048300 | 0.044931  | 0.003369  |
| 4  | 0.049600 | 0.054366  | -0.004766 |
| 5  | 0.062300 | 0.061268  | 0.001032  |
| 6  | 0.067500 | 0.072896  | -0.005396 |
| 7  | 0.069200 | 0.089244  | -0.020044 |
| 8  | 0.121100 | 0.106188  | 0.014912  |
| 9  | 0.131800 | 0.130427  | 0.001373  |

Results: Spreadsheet22

Model is:  $xe=A*(aw/(1-aw))^B$   
 Dependent variable: xe      Independent variables: 1  
 Loss function: least squares  
 Final value: .00082433  
 Proportion of variance accounted for: .91383941      R = .95594948

Quick | Advanced | Residuals | Review

Summary

Summary: Parameter estimates

Predicted values, Residuals, etc.

Iteration history

Analysis of Variance

Fitted 2D function & observed vals

Fitted 3D function & observed vals

Cancel

Options

By Group

**PARAMETROS OBTENIDOS, DATOS AJUSTADOS Y R<sup>2</sup> DEL MODELO DE OSWIN A 45°C**

| Model is: $xe=A*(aw/(1-aw))^B$ (Spreadsheet22) |          |                |                   |          |                |                |
|--|----------|----------------|-------------------|----------|----------------|----------------|
| Dep. Var. : xe                                 |          |                |                   |          |                |                |
| Level of confidence: 95.0% ( alpha=0.050)      |          |                |                   |          |                |                |
|  | Estimate | Standard error | t-value<br>df = 7 | p-value  | Lo. Conf Limit | Up. Conf Limit |
| A  | 0.054758 | 0.001311       | 41.77453          | 0.000000 | 0.051658       | 0.057857       |
| B  | 0.313262 | 0.017371       | 18.03415          | 0.000000 | 0.272188       | 0.354337       |

| Model is: $xe=A*(aw/(1-aw))^B$ (Spreadsheet22) |          |           |           |
|--|----------|-----------|-----------|
| Dep. Var. : xe                                 |          |           |           |
|  | Observed | Predicted | Residuals |
| 1  | 0.030500 | 0.027778  | 0.002722  |
| 2  | 0.038900 | 0.035288  | 0.003612  |
| 3  | 0.042900 | 0.042518  | 0.000382  |
| 4  | 0.044500 | 0.050124  | -0.005624 |
| 5  | 0.053700 | 0.054552  | -0.000852 |
| 6  | 0.065200 | 0.062231  | 0.002969  |
| 7  | 0.070300 | 0.074281  | -0.003981 |
| 8  | 0.082300 | 0.083069  | -0.000769 |
| 9  | 0.105800 | 0.103045  | 0.002755  |

Results: Spreadsheet22

Model is:  $xe=A*(aw/(1-aw))^B$   
 Dependent variable: xe      Independent variables: 1  
 Loss function: least squares  
 Final value: .00008581  
 Proportion of variance accounted for: .98139452      R = .99065358

Quick | Advanced | Residuals | Review

Summary: Parameter estimates  
 Predicted values, Residuals, etc.  
 Iteration history  
 Analysis of Variance  
 Fitted 2D function & observed vals  
 Fitted 3D function & observed vals

Summary  
 Cancel  
 Options  
 By Group

**PARAMETROS OBTENIDOS, DATOS AJUSTADOS Y R<sup>2</sup> DEL MODELO DE OSWIN A 55°C**

| Model is: $xe=A*(aw/(1-aw))^B$ (Spreadsheet22) |          |                |                   |          |                |                |
|--|----------|----------------|-------------------|----------|----------------|----------------|
| Dep. Var. : xe                                 |          |                |                   |          |                |                |
| Level of confidence: 95.0% ( alpha=0.050)      |          |                |                   |          |                |                |
|  | Estimate | Standard error | t-value<br>df = 7 | p-value  | Lo. Conf Limit | Up. Conf Limit |
| A  | 0.056083 | 0.001859       | 30.16512          | 0.000000 | 0.051686       | 0.060479       |
| B  | 0.211356 | 0.026054       | 8.11236           | 0.000083 | 0.149749       | 0.272962       |

| Model is: $xe=A*(aw/(1-aw))^B$ (Spreadsheet22) |          |           |           |
|--|----------|-----------|-----------|
| Dep. Var. : xe                                 |          |           |           |
|  | Observed | Predicted | Residuals |
| 1  | 0.030700 | 0.035074  | -0.004374 |
| 2  | 0.038600 | 0.040809  | -0.002209 |
| 3  | 0.040200 | 0.046864  | -0.006664 |
| 4  | 0.055700 | 0.052566  | 0.003134  |
| 5  | 0.060500 | 0.055156  | 0.005344  |
| 6  | 0.067400 | 0.059840  | 0.007560  |
| 7  | 0.068300 | 0.067774  | 0.000526  |
| 8  | 0.073000 | 0.071846  | 0.001154  |
| 9  | 0.079500 | 0.085078  | -0.005578 |

Results: Spreadsheet22

Model is:  $xe=A*(aw/(1-aw))^B$   
 Dependent variable: xe Independent variables: 1  
 Loss function: least squares  
 Final value: .00019668  
 Proportion of variance accounted for: .91538714 R = .95675866

Quick | Advanced | Residuals | Review

Summary: Parameter estimates  
 Predicted values, Residuals, etc.  
 Iteration history  
 Analysis of Variance  
 Fitted 2D function & observed vals  
 Fitted 3D function & observed vals

Summary  
 Cancel  
 Options  
 By Group



### ANEXO 5: Cálculo del error relativo porcentual para cada modelo y para cada temperatura

| GAB 35°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | xei-xcil   | xei-xcil /Xei | %E |
|----------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----|
|          | 1  | 0.028600 | 0.034171 | -0.005571 | 0.0055715  | 0.19480755    |    |
|          | 2  | 0.048300 | 0.038894 | 0.009406  | 0.00940618 | 0.19474484    |    |
|          | 3  | 0.048300 | 0.043892 | 0.004408  | 0.00440756 | 0.09125382    |    |
|          | 4  | 0.049600 | 0.051170 | -0.001570 | 0.00156967 | 0.03164665    |    |
|          | 5  | 0.062300 | 0.057434 | 0.004866  | 0.00486554 | 0.07809849    |    |
|          | 6  | 0.067500 | 0.069439 | -0.001939 | 0.00193942 | 0.02873211    |    |
|          | 7  | 0.069200 | 0.088151 | -0.018951 | 0.01895134 | 0.27386327    |    |
|          | 8  | 0.121100 | 0.107824 | 0.013276  | 0.01327583 | 0.10962697    |    |
|          | 9  | 0.131800 | 0.133258 | -0.001458 | 0.00145764 | 0.01105947    |    |
| SUMA     |    |          |          |           | 1.013833   |               |    |

| GAB 45°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | xei-xcil    | xei-xcil /Xei | %E |
|----------|----|----------|----------|-----------|-------------|---------------|----|
|          | 1  | 0.030500 | 0.031904 | -0.001404 | 0.001403758 | 0.046024861   |    |
|          | 2  | 0.038900 | 0.036551 | 0.002349  | 0.002348839 | 0.060381467   |    |
|          | 3  | 0.042900 | 0.041591 | 0.001309  | 0.001309378 | 0.030521621   |    |
|          | 4  | 0.044500 | 0.048035 | -0.003535 | 0.003534938 | 0.079436801   |    |
|          | 5  | 0.053700 | 0.052333 | 0.001367  | 0.001367091 | 0.025457941   |    |
|          | 6  | 0.065200 | 0.060541 | 0.004659  | 0.004658576 | 0.071450556   |    |
|          | 7  | 0.070300 | 0.074397 | -0.004097 | 0.004096721 | 0.058274837   |    |
|          | 8  | 0.082300 | 0.084359 | -0.002059 | 0.002059202 | 0.025020683   |    |
|          | 9  | 0.105800 | 0.103883 | 0.001917  | 0.001917444 | 0.018123288   |    |
| SUMA     |    |          |          |           | 0.41469206  |               |    |

| GAB 55°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | xei-xcil   | xei-xcil /Xei | %E |
|----------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----|
|          | 1  | 0.030700 | 0.028215 | 0.002485  | 0.00248512 | 0.08094852    |    |
|          | 2  | 0.038600 | 0.038546 | 0.000054  | 5.3678E-05 | 0.00139061    |    |
|          | 3  | 0.040200 | 0.047645 | -0.007445 | 0.00744503 | 0.18519983    |    |
|          | 4  | 0.055700 | 0.054931 | 0.000769  | 0.00076895 | 0.01380512    |    |
|          | 5  | 0.060500 | 0.057939 | 0.002561  | 0.0025613  | 0.04233549    |    |
|          | 6  | 0.067400 | 0.062952 | 0.004448  | 0.00444821 | 0.06599724    |    |
|          | 7  | 0.068300 | 0.070139 | -0.001839 | 0.00183887 | 0.02692347    |    |
|          | 8  | 0.073000 | 0.073158 | -0.000158 | 0.00015813 | 0.00216615    |    |
|          | 9  | 0.079500 | 0.080094 | -0.000594 | 0.00059409 | 0.00747277    |    |
| SUMA     |    |          |          |           | 0.42623921 |               |    |

| CHUNG PFOST 35°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | lxei-xcil   | lxei-xcil/Xei | %E             |
|------------------|----|----------|----------|-----------|-------------|---------------|----------------|
|                  | 1  | 0.108100 | 0.095920 | 0.012180  | 0.012180    | 0.11267087    | <b>15.7293</b> |
|                  | 2  | 0.215500 | 0.341381 | -0.125881 | 0.125881    | 0.58413478    |                |
|                  | 3  | 0.318000 | 0.341381 | -0.023381 | 0.023381    | 0.0735253     |                |
|                  | 4  | 0.436300 | 0.360290 | 0.076010  | 0.076010    | 0.17421386    |                |
|                  | 5  | 0.515400 | 0.539308 | -0.023908 | 0.023908    | 0.04638664    |                |
|                  | 6  | 0.628000 | 0.604961 | 0.023039  | 0.023039    | 0.03668559    |                |
|                  | 7  | 0.743000 | 0.625077 | 0.117923  | 0.117923    | 0.15871174    |                |
|                  | 8  | 0.821100 | 0.941563 | -0.120463 | 0.120463    | 0.1467093     |                |
|                  | 9  | 0.888000 | 0.961345 | -0.073345 | 0.073345    | 0.08259571    |                |
| SUMA             |    |          |          |           | 1.415633784 |               |                |

| CHUNG PFOST 45°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | lxei-xcil  | lxei-xcil/Xei | %E             |
|------------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|
|                  | 1  | 0.102800 | 0.139625 | -0.036825 | 0.03682468 | 0.3582167     | <b>11.8365</b> |
|                  | 2  | 0.197400 | 0.252345 | -0.054945 | 0.05494474 | 0.27834212    |                |
|                  | 3  | 0.308400 | 0.313051 | -0.004651 | 0.00465063 | 0.01507987    |                |
|                  | 4  | 0.429900 | 0.337926 | 0.091974  | 0.09197402 | 0.21394282    |                |
|                  | 5  | 0.497000 | 0.480280 | 0.016720  | 0.01671994 | 0.03364172    |                |
|                  | 6  | 0.600700 | 0.637936 | -0.037236 | 0.0372357  | 0.06198718    |                |
|                  | 7  | 0.725800 | 0.696421 | 0.029379  | 0.02937906 | 0.04047817    |                |
|                  | 8  | 0.790900 | 0.804857 | -0.013957 | 0.01395696 | 0.01764693    |                |
|                  | 9  | 0.882700 | 0.923263 | -0.040563 | 0.04056295 | 0.04595327    |                |
| SUMA             |    |          |          |           | 1.06528877 |               |                |

| CHUNG PFOST 55°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | lxei-xcil  | lxei-xcil/Xei | %E             |
|------------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|
|                  | 1  | 0.028600 | 0.034171 | -0.005571 | 0.0055715  | 0.19480755    | <b>11.2648</b> |
|                  | 2  | 0.048300 | 0.038894 | 0.009406  | 0.00940618 | 0.19474484    |                |
|                  | 3  | 0.048300 | 0.043892 | 0.004408  | 0.00440756 | 0.09125382    |                |
|                  | 4  | 0.049600 | 0.051170 | -0.001570 | 0.00156967 | 0.03164665    |                |
|                  | 5  | 0.062300 | 0.057434 | 0.004866  | 0.00486554 | 0.07809849    |                |
|                  | 6  | 0.067500 | 0.069439 | -0.001939 | 0.00193942 | 0.02873211    |                |
|                  | 7  | 0.069200 | 0.088151 | -0.018951 | 0.01895134 | 0.27386327    |                |
|                  | 8  | 0.121100 | 0.107824 | 0.013276  | 0.01327583 | 0.10962697    |                |
|                  | 9  | 0.131800 | 0.133258 | -0.001458 | 0.00145764 | 0.01105947    |                |
| SUMA             |    |          |          |           | 1.013833   |               |                |

| HALSEY 35°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | lxei-xcil   | lxei-xcil/Xei | %E            |
|-------------|----|----------|----------|-----------|-------------|---------------|---------------|
|             | 1  | 0.108100 | 0.026378 | 0.081722  | 0.0817223   | 0.75598798    | <b>21.309</b> |
|             | 2  | 0.215500 | 0.340930 | -0.125430 | 0.12543026  | 0.58204297    |               |
|             | 3  | 0.318000 | 0.340930 | -0.022930 | 0.02293026  | 0.07210773    |               |
|             | 4  | 0.436300 | 0.363604 | 0.072696  | 0.07269633  | 0.16662006    |               |
|             | 5  | 0.515400 | 0.551161 | -0.035761 | 0.03576114  | 0.06938521    |               |
|             | 6  | 0.628000 | 0.609874 | 0.018126  | 0.01812565  | 0.02886249    |               |
|             | 7  | 0.743000 | 0.627044 | 0.115956  | 0.11595599  | 0.15606459    |               |
|             | 8  | 0.821100 | 0.880560 | -0.059460 | 0.05946021  | 0.07241531    |               |
|             | 9  | 0.888000 | 0.900788 | -0.012788 | 0.01278826  | 0.0144012     |               |
| SUMA        |    |          |          |           | 1.917887539 |               |               |

| HALSEY 45°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | lxei-xcil  | lxei-xcil/Xei | %E             |
|-------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|
|             | 1  | 0.102800 | 0.088889 | 0.013911  | 0.01391092 | 0.1353202     | <b>9.08925</b> |
|             | 2  | 0.197400 | 0.248944 | -0.051544 | 0.0515442  | 0.26111548    |                |
|             | 3  | 0.308400 | 0.328707 | -0.020307 | 0.02030744 | 0.06584774    |                |
|             | 4  | 0.429900 | 0.359322 | 0.070578  | 0.07057768 | 0.16417231    |                |
|             | 5  | 0.497000 | 0.513218 | -0.016218 | 0.01621816 | 0.03263211    |                |
|             | 6  | 0.600700 | 0.651350 | -0.050650 | 0.05065024 | 0.0843187     |                |
|             | 7  | 0.725800 | 0.696900 | 0.028900  | 0.0288999  | 0.03981799    |                |
|             | 8  | 0.790900 | 0.777107 | 0.013793  | 0.0137932  | 0.01743987    |                |
|             | 9  | 0.882700 | 0.867369 | 0.015331  | 0.01533082 | 0.0173681     |                |
| SUMA        |    |          |          |           | 0.81803251 |               |                |

| HALSEY 55°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | lxei-xcil  | lxei-xcil/Xei | %E             |
|-------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|
|             | 1  | 0.028600 | 0.034171 | -0.005571 | 0.0055715  | 0.19480755    | <b>16.7953</b> |
|             | 2  | 0.048300 | 0.038894 | 0.009406  | 0.00940618 | 0.19474484    |                |
|             | 3  | 0.048300 | 0.043892 | 0.004408  | 0.00440756 | 0.09125382    |                |
|             | 4  | 0.049600 | 0.051170 | -0.001570 | 0.00156967 | 0.03164665    |                |
|             | 5  | 0.062300 | 0.057434 | 0.004866  | 0.00486554 | 0.07809849    |                |
|             | 6  | 0.067500 | 0.069439 | -0.001939 | 0.00193942 | 0.02873211    |                |
|             | 7  | 0.069200 | 0.088151 | -0.018951 | 0.01895134 | 0.27386327    |                |
|             | 8  | 0.121100 | 0.107824 | 0.013276  | 0.01327583 | 0.10962697    |                |
|             | 9  | 0.131800 | 0.133258 | -0.001458 | 0.00145764 | 0.01105947    |                |
| SUMA        |    |          |          |           | 1.013833   |               |                |

| OSWIN 35°C | Nº | xei      | xcí      | xei-xci   | lxei-xcil  | lxei-xcil/Xei | %E             |
|------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|
|            | 1  | 0.028600 | 0.027069 | 0.001531  | 0.00153115 | 0.05353665    | <b>10.8523</b> |
|            | 2  | 0.048300 | 0.036823 | 0.011477  | 0.01147706 | 0.2376202     |                |
|            | 3  | 0.048300 | 0.044931 | 0.003369  | 0.0033692  | 0.0697556     |                |
|            | 4  | 0.049600 | 0.054366 | -0.004766 | 0.00476556 | 0.09607987    |                |
|            | 5  | 0.062300 | 0.061268 | 0.001032  | 0.00103168 | 0.01655981    |                |
|            | 6  | 0.067500 | 0.072896 | -0.005396 | 0.00539615 | 0.07994294    |                |
|            | 7  | 0.069200 | 0.089244 | -0.020044 | 0.02004389 | 0.28965162    |                |
|            | 8  | 0.121100 | 0.106188 | 0.014912  | 0.0149121  | 0.12313871    |                |
|            | 9  | 0.131800 | 0.130427 | 0.001373  | 0.00137316 | 0.01041848    |                |
| SUMA       |    |          |          |           |            | 0.97670387    |                |

| OSWIN 45°C | Nº | xei      | xcí      | xei-xci   | lxei-xcil  | lxei-xcil/Xei | %E             |
|------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|
|            | 1  | 0.030500 | 0.027778 | 0.002722  | 0.00272212 | 0.08924971    | <b>5.23143</b> |
|            | 2  | 0.038900 | 0.035288 | 0.003612  | 0.0036124  | 0.09286367    |                |
|            | 3  | 0.042900 | 0.042518 | 0.000382  | 0.00038201 | 0.00890458    |                |
|            | 4  | 0.044500 | 0.050124 | -0.005624 | 0.00562401 | 0.12638224    |                |
|            | 5  | 0.053700 | 0.054552 | -0.000852 | 0.00085242 | 0.01587382    |                |
|            | 6  | 0.065200 | 0.062231 | 0.002969  | 0.00296906 | 0.04553772    |                |
|            | 7  | 0.070300 | 0.074281 | -0.003981 | 0.00398108 | 0.05662992    |                |
|            | 8  | 0.082300 | 0.083069 | -0.000769 | 0.00076911 | 0.00934522    |                |
|            | 9  | 0.105800 | 0.103045 | 0.002755  | 0.00275522 | 0.02604181    |                |
| SUMA       |    |          |          |           |            | 0.47082869    |                |

| OSWIN 55°C | Nº | xei      | xcí      | xei-xci   | lxei-xcil  | lxei-xcil/Xei | %E             |
|------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|
|            | 1  | 0.030700 | 0.035074 | -0.004374 | 0.00437372 | 0.14246659    | <b>7.95443</b> |
|            | 2  | 0.038600 | 0.040809 | -0.002209 | 0.00220913 | 0.05723143    |                |
|            | 3  | 0.040200 | 0.046864 | -0.006664 | 0.00666368 | 0.16576309    |                |
|            | 4  | 0.055700 | 0.052566 | 0.003134  | 0.00313376 | 0.05626142    |                |
|            | 5  | 0.060500 | 0.055156 | 0.005344  | 0.00534404 | 0.08833132    |                |
|            | 6  | 0.067400 | 0.059840 | 0.007560  | 0.00756032 | 0.11217095    |                |
|            | 7  | 0.068300 | 0.067774 | 0.000526  | 0.00052617 | 0.00770383    |                |
|            | 8  | 0.073000 | 0.071846 | 0.001154  | 0.00115359 | 0.01580264    |                |
|            | 9  | 0.079500 | 0.085078 | -0.005578 | 0.00557833 | 0.07016773    |                |
| SUMA       |    |          |          |           |            | 0.71589901    |                |

| BET 35°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | xei-xcil    | xei-xcil /Xei | %E            |
|----------|----|----------|----------|-----------|-------------|---------------|---------------|
|          | 1  | 0.028600 | 0.012212 | 0.016388  | 0.01638776  | 0.57299853    | <b>21.454</b> |
|          | 2  | 0.048300 | 0.024490 | 0.023810  | 0.02381021  | 0.49296495    |               |
|          | 3  | 0.048300 | 0.036404 | 0.011896  | 0.011896    | 0.24629403    |               |
|          | 4  | 0.049600 | 0.050533 | -0.000933 | 0.00093279  | 0.01880615    |               |
|          | 5  | 0.062300 | 0.060346 | 0.001954  | 0.00195431  | 0.03136934    |               |
|          | 6  | 0.067500 | 0.075242 | -0.007742 | 0.00774171  | 0.114692      |               |
|          | 7  | 0.069200 | 0.092921 | -0.023721 | 0.02372128  | 0.34279303    |               |
|          | 8  | 0.121100 | 0.108777 | 0.012323  | 0.01232308  | 0.10175954    |               |
|          | 9  | 0.131800 | 0.130582 | 0.001218  | 0.00121836  | 0.00924401    |               |
| SUMA     |    |          |          |           | 1.930921591 |               |               |

| BET 45°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | xei-xcil   | xei-xcil /Xei | %E             |
|----------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|
|          | 1  | 0.030500 | 0.011128 | 0.019372  | 0.01937176 | 0.63513967    | <b>18.0632</b> |
|          | 2  | 0.038900 | 0.021389 | 0.017511  | 0.01751105 | 0.45015555    |                |
|          | 3  | 0.042900 | 0.033464 | 0.009436  | 0.00943596 | 0.21995239    |                |
|          | 4  | 0.044500 | 0.046751 | -0.002251 | 0.00225067 | 0.05057681    |                |
|          | 5  | 0.053700 | 0.054138 | -0.000438 | 0.00043792 | 0.00815489    |                |
|          | 6  | 0.065200 | 0.065675 | -0.000475 | 0.00047465 | 0.00727992    |                |
|          | 7  | 0.070300 | 0.079996 | -0.009696 | 0.0096956  | 0.13791746    |                |
|          | 8  | 0.082300 | 0.087868 | -0.005568 | 0.00556781 | 0.06765266    |                |
|          | 9  | 0.105800 | 0.100631 | 0.005169  | 0.00516882 | 0.04885467    |                |
| SUMA     |    |          |          |           | 1.62568401 |               |                |

| BET 55°C | N° | xei      | xcil     | xei-xcil  | xei-xcil   | xei-xcil /Xei | %E             |
|----------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|
|          | 1  | 0.030700 | 0.010294 | 0.020406  | 0.02040626 | 0.66469906    | <b>24.5203</b> |
|          | 2  | 0.038600 | 0.019116 | 0.019484  | 0.01948443 | 0.50477785    |                |
|          | 3  | 0.040200 | 0.031492 | 0.008708  | 0.00870832 | 0.21662495    |                |
|          | 4  | 0.055700 | 0.044583 | 0.011117  | 0.01111661 | 0.19958013    |                |
|          | 5  | 0.060500 | 0.050504 | 0.009996  | 0.00999611 | 0.16522501    |                |
|          | 6  | 0.067400 | 0.060579 | 0.006821  | 0.00682106 | 0.10120261    |                |
|          | 7  | 0.068300 | 0.074675 | -0.006375 | 0.00637452 | 0.09333118    |                |
|          | 8  | 0.073000 | 0.080294 | -0.007294 | 0.00729394 | 0.09991694    |                |
|          | 9  | 0.079500 | 0.092337 | -0.012837 | 0.0128368  | 0.16146915    |                |
| SUMA     |    |          |          |           | 2.20682687 |               |                |

| HENDERSON 35°C | Nº | xei      | xcil     | xei-xcil  | xei-xcil   | xei-xcil /Xe <sub>i</sub> | %E             |
|----------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------------------|----------------|
|                | 1  | 0.108100 | 0.145792 | -0.037692 | 0.03769184 | 0.34867569                | <b>19.9822</b> |
|                | 2  | 0.215500 | 0.359376 | -0.143876 | 0.14387621 | 0.66763903                |                |
|                | 3  | 0.318000 | 0.359376 | -0.041376 | 0.04137621 | 0.13011387                |                |
|                | 4  | 0.436300 | 0.374615 | 0.061685  | 0.06168508 | 0.14138227                |                |
|                | 5  | 0.515400 | 0.521726 | -0.006326 | 0.00632647 | 0.01227488                |                |
|                | 6  | 0.628000 | 0.578788 | 0.049212  | 0.04921234 | 0.07836359                |                |
|                | 7  | 0.743000 | 0.596799 | 0.146201  | 0.14620076 | 0.19677087                |                |
|                | 8  | 0.821100 | 0.936360 | -0.115260 | 0.11525993 | 0.14037259                |                |
|                | 9  | 0.888000 | 0.961532 | -0.073532 | 0.07353186 | 0.08280615                |                |
| SUMA           |    |          |          |           | 1.79839893 |                           |                |

| HENDERSON 45°C | Nº | xei      | xcil     | xei-xcil  | xei-xcil   | xei-xcil /Xe <sub>i</sub> | %E             |
|----------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------------------|----------------|
|                | 1  | 0.102800 | 0.163997 | -0.061197 | 0.06119699 | 0.5953015                 | <b>15.7435</b> |
|                | 2  | 0.197400 | 0.265111 | -0.067711 | 0.067711   | 0.34301419                |                |
|                | 3  | 0.308400 | 0.318268 | -0.009868 | 0.009868   | 0.03199739                |                |
|                | 4  | 0.429900 | 0.340118 | 0.089782  | 0.08978208 | 0.2088441                 |                |
|                | 5  | 0.497000 | 0.468427 | 0.028573  | 0.02857307 | 0.05749108                |                |
|                | 6  | 0.600700 | 0.622354 | -0.021654 | 0.02165393 | 0.03604782                |                |
|                | 7  | 0.725800 | 0.683919 | 0.041881  | 0.04188096 | 0.05770316                |                |
|                | 8  | 0.790900 | 0.805325 | -0.014425 | 0.0144247  | 0.01823834                |                |
|                | 9  | 0.882700 | 0.942971 | -0.060271 | 0.060271   | 0.06828028                |                |
| SUMA           |    |          |          |           | 1.41691785 |                           |                |

| HENDERSON 55°C | Nº | xei      | xcil     | xei-xcil  | xei-xcil   | xei-xcil /Xe <sub>i</sub> | %E             |
|----------------|----|----------|----------|-----------|------------|---------------------------|----------------|
|                | 1  | 0.097900 | 0.100641 | -0.002741 | 0.00274119 | 0.02799993                | <b>9.41818</b> |
|                | 2  | 0.181800 | 0.187168 | -0.005368 | 0.00536806 | 0.02952727                |                |
|                | 3  | 0.299500 | 0.208138 | 0.091362  | 0.09136229 | 0.30504938                |                |
|                | 4  | 0.424000 | 0.454302 | -0.030302 | 0.03030206 | 0.07146713                |                |
|                | 5  | 0.480300 | 0.537605 | -0.057305 | 0.05730545 | 0.11931177                |                |
|                | 6  | 0.576100 | 0.652796 | -0.076696 | 0.07669607 | 0.13312979                |                |
|                | 7  | 0.710100 | 0.667025 | 0.043075  | 0.04307512 | 0.06066063                |                |
|                | 8  | 0.763500 | 0.737097 | 0.026403  | 0.02640305 | 0.0345816                 |                |
|                | 9  | 0.877800 | 0.819946 | 0.057854  | 0.0578544  | 0.06590841                |                |
| SUMA           |    |          |          |           | 0.84763593 |                           |                |