

# UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
AGROINDUSTRIAL



## TESIS

**“Evaluación de las isotermas de sorción de las hojas de sachaculantro (*Eryngium Foetidum* L.)”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

### **AUTORES:**

**Bach. COLLQQUESAÑA APAZA, Cecilia Prisca**

**Bach. CHILLIHUANI CORONADO, Julio Cesar**

### **Asesor:**

**Dr. COLQUEHUANCA VILCA, Julián**

### **Co-asesores:**

**MG. PULLA HUILLCA, Palmer Vicente**

**Puerto Maldonado, noviembre de 2024**

# UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
AGROINDUSTRIAL



**TESIS**

**“Evaluación de las isotermas de sorción de las hojas de sachaculantro (*Eryngium Foetidum* L.)”**

**Proyecto de Tesis presentado por:**

**Bach. COLLQQUESAÑA APAZA, Cecilia Prisca**

**Bach. CHILLIHUANI CORONADO, Julio Cesar**

**Para Optar el Título Profesional de Ingeniero  
Agroindustrial**

**Asesor:**

**Dr. COLQUEHUANCA VILCA, Julián**

**Co-asesores:**

**MG. PULLA HUILLCA, Palmer Vicente**

**Puerto Maldonado, noviembre de 2024,**

## **DEDICATORIA**

Primeramente, a Dios a mis padres Victoria y Francisco que desde un principio siempre tuve su apoyo.

A mi esposa Yessica mis hijos Luis, Ariana, Sayumi y Dayiro, a mis hermanos Juan, Luis, Karina, Wilson, Betsi mil gracias

JULIO

## **DEDICATORIA**

Ante todo, a Dios por escuchar mis oraciones, por guiarme por el buen camino y por brindarme salud, sabiduría y entendimiento.

A mis padres José y Yolanda por su apoyo.

A mi esposo Wilmer Toribio y a mi hijo Thiago Adriano, a mis hermanos Juan José, Mercedes, Elvis por el apoyo incondicional

CECILIA

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primer lugar a Dios por guiarme en toda esta trayectoria que llamamos vida y ser la fuerza invisible que me empuja cada vez para ser mejor día a día.

A todos mis docentes, quienes me brindaron su tiempo, paciencia y conocimiento para forjar mi propio camino hacia una vida profesional.

Al Dr. Julián Colquehuanca Vilca, por brindar sus conocimientos, experiencias durante mi formación académica y por el apoyo incondicional y asesoramiento durante el desarrollo de esta Tesis.

Al Mg. Palmer Vicente Pulla Huilca por brindar sus conocimientos, experiencias durante mi formación académica y por el apoyo incondicional y asesoramiento durante el desarrollo de esta Tesis.

A la Ing. Luzbenia Motta Machicado por brindarnos su apoyo y colaboración.

A los miembros del jurado, conformado por el Dr. Maria Isabel Cajo Pinche, Mg. Pedro Saúl Montalván Apolaya y Mg. Yony Flora Fernández Herrera, por dedicar parte de su tiempo y brindar sus sugerencias y acotaciones, lo cual sirvió para fortalecer y enriquecer el presente trabajo de investigación. Y finalmente un agradecimiento muy especial a todos mis amigos, y aquellas personas que me apoyaron en la realización del presente trabajo.

A la Empresa Inkacrops S.A, por su aporte en conocimiento en las hierbas aromáticas

Y un agradecimiento muy especial a mis amigas, Ana, Nery, Jenny, Carmen, y a las Ing. Silvia, Ing. Magaly, Ing. Aurora, y a todas las personas que apoyaron en la realización del presente trabajo de tesis.

# TURNITIN\_CECILIA CCOLQQUESAÑA Y JULIO CHILLIHUANI

## INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.unamad.edu.pe">repositorio.unamad.edu.pe</a> Fuente de Internet	8%
2	<a href="https://pt.scribd.com">pt.scribd.com</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="https://repositorio.uta.edu.ec">repositorio.uta.edu.ec</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://repositorio.unal.edu.co">repositorio.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://repositorio.unapiquitos.edu.pe">repositorio.unapiquitos.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

## PRESENTACIÓN

La presente investigación se centra en un producto agrícola tradicional y representativo de la región Amazónica: el sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.), una hierba de gran importancia que se utiliza comúnmente fresca en la gastronomía local y, en menor medida, por sus propiedades medicinales. Sin embargo, este producto no se comercializa en presentaciones que involucren procesos agroindustriales como la liofilización y/o el secado, lo que limita su comercialización y almacenamiento a corto plazo. Además, la revisión de la literatura científica revela una escasez de información relacionada con sus condiciones ideales de procesamiento y vida útil en anaquel. Ante esta realidad, se plantea la presente investigación titulada: “Evaluación de las isotermas de sorción de las hojas de sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.)”. Esta investigación proporcionará datos relevantes, como las condiciones óptimas de secado, almacenamiento (tipo de empaque y condiciones de humedad relativa y temperatura) que permitan garantizar una mayor vida útil sin comprometer su calidad. El presente documento, consta de 3 capítulos:

En el capítulo I se presenta el problema de investigación, formulación del problema, variables, objetivos e hipótesis.

El capítulo II concierne al marco teórico donde se presentan los antecedentes de la investigación, marco teórico, definiciones teóricas básicas, usos clasificación y propiedades del sachá culantro.

El capítulo III presenta la metodología de la investigación, el diseño de estudio, población muestra, materia prima, reactivos, lugar de ejecución y tratamiento de datos, es la parte experimental.

Finalmente, el capítulo IV contiene las conclusiones, sugerencias y referencias bibliográficas.

## RESUMEN

El trabajo tuvo como objetivo la obtención de isothermas de sorción de las hojas de sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.) Las isothermas fueron determinadas a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C, con soluciones salinas saturadas en un rango de actividades de agua ( $a_w$ ) de 0.11 a 0.85. La sorción del sachá culantro exhibieron un comportamiento del tipo II, Se observó que la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) disminuye con el incremento de la temperatura para una determinada  $a_w$ , Según los parámetros, el modelo comúnmente utilizado en alimentos fue el de GAB que mejor se ajustó al comportamiento experimental de isothermas de sorción del sachá culantro, presentando valores de coeficientes de determinación  $R^2$  de 99%, desvío porcentual medio  $E\%$  menores del 10%. La humedad de la monocapa  $X_m$  del modelo de GAB presentó dependencia con la temperatura, disminuyendo de 0.0651 a 0.0469 g agua/g m.s., en un rango de temperatura de 25°C a 55°C para la adsorción y de 0,0556 a 0,0376 g agua/g m.s en un rango de temperatura de 35 a 55 °C para la desorción A partir de la ecuación de tsami se calculó el calor isostérico de adsorción y desorción ( $q_{st}$ ), observándose que los valores  $q_{st}$  disminuyen con el incremento del contenido de humedad, de 50,2257054 a 0.91113126 kJ/mol para humedades de 0.073 a 0.39 y de 85.210186 a 1,110168 kJ/mol para humedades de 0,039 a 0,479 g agua/g m.s respectivamente. Palabras clave: “hojas de sachá culantro” (*Eryngium foetidum* L.), isothermas de sorción, calor isostérico, entropía.

## ABSTRACT

The work was aimed at obtaining sorption isotherms of sacha culantro leaves ( *Eryngium foetidum* L .). The isotherms were determined at temperatures of 35°C, 45°C and 55°C, with saturated saline solutions in a range of water activities (  $a_w$  ) from 0.11 to 0.85. The sorption of sacha culantro exhibited type II behavior. It was observed that the equilibrium humidity ( $X_e$ ) decreases with increasing temperature for a given  $a_w$  . According to the parameters, the model commonly used in foods was the GAB model that best fit the experimental behavior of sorption isotherms of sacha culantro, presenting coefficients of determination  $R^2$  values of 99%, mean percentage deviation E% less than 10%. The humidity of the monolayer  $X_m$  of the GAB model showed dependence on temperature, decreasing from 0.0651 to 0.0469 g water/g dm, in a temperature range of 25°C to 55°C for adsorption and from 0.0556 to 0.0376 g water/g dm in a temperature range of 35 to 55 °C for desorption. From the Tsami equation, the isosteric heat of adsorption and desorption ( $q_{st}$ ) was calculated, observing that the  $q_{st}$  values decrease with increasing moisture content, from 50.2257054 to 0.91113126 kJ/mol for humidities of 0.073 to 0.39 and from 85.210186 to 1.110168 kJ/mol for humidities of 0.039 to 0.479 g water/g DM respectively. Keywords: “sacha culantro leaves” ( *Eryngium foetidum* L. ), sorption isotherms, isosteric heat.

## INTRODUCCIÓN

El sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.) pertenece a la familia Apiaceae y es originario de América Central, habiendo sido introducido en el sudeste asiático por los chinos como un sustituto del cilantro (Jaramillo et al., 2011). En la Amazonía peruana, especialmente en la región de Madre de Dios, esta hierba se utiliza en la gastronomía local debido a su aroma y sabor particular, siendo un ingrediente esencial en la preparación y acompañamiento de diversos platos. Además de sus usos culinarios, el sachá culantro ha sido ampliamente investigado en varios países por sus propiedades antioxidantes y medicinales (Heredia Baca, 2002). El uso del sachá culantro fresco es limitado debido a su naturaleza perecedera; asimismo, la forma seca de esta hierba no es común en la industria alimentaria. Las hierbas frescas suelen contener entre un 60% y 80% de agua, niveles que deben reducirse hasta, al menos, un 15% para su adecuada conservación (Hilbay et al., 2016). Por su alto contenido de humedad y su vulnerabilidad al ataque de microorganismos, es fundamental proporcionar un secado óptimo y garantizar condiciones de almacenamiento adecuadas para preservar su calidad.

A pesar de ser una hierba representativa de la región, con muchos usos tradicionales en toda la Amazonía, y de poseer propiedades bioactivas y farmacológicas (actividad anticonvulsiva, antiinflamatoria, analgésica y antibacteriana), aún no se ha reportado bibliografía que incluya datos sobre el contenido de humedad de la monocapa, las propiedades de sorción de humedad y las propiedades termodinámicas de esta planta aromática. Este tipo de información es crucial para determinar el punto óptimo en un proceso de secado y mejorar su estabilidad durante el almacenamiento. Por otro lado, las isotermas de sorción describen la relación entre el contenido de humedad y la actividad del agua de un producto, considerando factores como su composición química, estructura físico-química, estado físico y temperatura (García et al., 2007). La obtención de las isotermas del sachá culantro permitiría establecer condiciones óptimas de almacenamiento. El presente estudio tiene como objetivo evaluar las isotermas de sorción del sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.), lo que proporcionaría información científica valiosa para revalorizar esta hierba mediante procesos mínimos y promover su cultivo en nuestra región.

## INDICE GENERAL

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.1. Descripción del problema .....	1
1.2. Formulación del problema .....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos .....	3
1.4. Variables .....	4
1.4.1. Variables Independientes:.....	4
1.4.2. Variables dependientes: .....	4
1.5. Operacionalización de variables.....	5
1.6. Hipótesis .....	5
1.7. Justificación.....	6
1.8. Consideraciones éticas. ....	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	8
2.1. Antecedentes de estudio .....	8
2.2. Marco teórico .....	13
2.2.1. Plantas aromáticas .....	13
2.2.2. Sacha culantro ( <i>Eryngium foetidum</i> L.).....	13
2.2.2.1. Clasificación taxonómica .....	14
2.2.3. Isotermas de sorción.....	15
2.2.3.1. Clasificación de las isotermas de sorción.....	17
2.2.3.2. Efecto de la temperatura en las isotermas de sorción.....	18
2.2.3.3. Modelamiento de las “isotermas de sorción” .....	20
2.2.3.4. Propiedades termodinámicas .....	23
2.4. Definición de términos .....	25
2.4.1. Actividad de agua ( $a_w$ ) .....	25

2.4.2.	Isotermas de sorción.....	25
2.4.3.	Entalpía diferencial .....	25
2.4.4.	Energía de activación .....	25
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....		27
3.1.	Tipo de estudio.....	27
3.2.	Diseño del estudio.....	27
3.2.	Población y muestra .....	30
3.2.1.	Población .....	30
3.2.2.	Muestra .....	30
3.3.	Métodos y técnicas .....	30
3.3.1.	Materiales y equipos .....	30
3.3.1.1.	Lugar de ejecución.....	30
3.3.1.2.	Materia prima .....	30
3.3.1.3.	Reactivos .....	31
3.3.1.4.	Equipos .....	31
3.3.1.5.	Materiales .....	31
3.3.1.6.	Soluciones químicas de limpieza y desinfección .....	32
3.3.3.	Metodología .....	32
3.3.3.1.	Caracterización de la materia prima.....	32
3.3.3.2.	Acondicionamiento de las muestras.....	33
3.3.3.3.	Obtención de las isotermas de sorción .....	36
3.3.3.4.	Determinación del contenido de humedad de equilibrio ( $X_e$ ).....	38
3.3.3.5.	Determinación del contenido de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) .....	39
3.4.	Tratamiento de datos .....	41
3.4.1.	Técnica de análisis de datos.....	41
CAPÍTULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....		43
4.1.	Resultados del análisis fisicoquímico de hojas de sachá culantro .....	43

4.2.	Datos experimentales de las isothermas de desorción y adsorción a diferentes temperaturas para las hojas de Sacha culantro.....	43
4.2.1.	Modelado de las isothermas de adsorción.....	43
4.2.2.	Isothermas de adsorción de Sacha culantro según cada modelo de ajuste	45
4.2.3.	Propiedades termodinámicas para la adsorción .....	61
4.3.3.1	Entalpia diferencial (Calor isostérico de adsorción (qst)) y entropía diferencial ( $\Delta S$ ).....	61
4.2.4.	Modelado de las isothermas de desorción.....	66
4.2.5.	Isothermas de desorción de Sacha culantro según cada modelo de ajuste	68
4.2.6.	Propiedades termodinámicas de desorción .....	81
4.2.6.1.	Entalpia diferencial (Calor isostérico de desorción (qst)) y entropía diferencial ( $\Delta S$ ).....	81
	CONCLUSIONES .....	89
	SUGERENCIAS.....	91
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
	ANEXOS	102

## INDICE DE TABLAS Y CUADROS

Cuadro 1. Operacionalización de variables para las isothermas de sorción y propiedades termodinámicas de las hojas de sachá culantro.....	5
Tabla 1. Composición Química de las hojas de Sachá culantro frescas y secas .	15
Tabla 2. Sales y ecuaciones de regresión utilizadas para obtener una $a_w$ a una determinada temperatura (K).....	36
Tabla 3. Humedades relativas en función de las temperaturas de estudio.....	37
Tabla 4. Cantidad de sal y agua recomendadas para la preparación de soluciones salinas saturadas .....	38
Tabla 5. Análisis Fisicoquímico de las hojas de sachá culantro .....	43
Tabla 6. Parámetros estimados y criterios de ajuste de los modelos para las isothermas de adsorción de Sachá culantro. ....	44
Tabla 7. Valores de $q_{st}$ experimentales y calculados mediante la ec° de Tsami...	61
Tabla 8. Parámetros considerados para los cálculos en la ecuación de Tsami....	63
Tabla 9. Valores de entropía diferencial ( $\Delta S$ ) para la adsorción.....	63
Tabla 10. Teoría de compensación entalpía- entropía para la adsorción .....	65
Tabla 11. Parámetros estimados y criterios de ajuste de los modelos para las isothermas de desorción de Sachá culantro. ....	67
Tabla 12. Valores de $q_{st}$ experimentales y calculados mediante la ec° de Tsami...	81
Tabla 13. Parámetros considerados para los cálculos en la ecuación de Tsami....	83
Tabla 14. Entropía diferencial ( $\Delta S$ ).....	83
Tabla 15. Teoría de compensación Entalpía-Entropía .....	86

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sacha culantro ( <i>Eryngium foetidum</i> L.): (A) aspectos generales de la especie; (B) inflorescencia .....	14
Figura 2. Isotermas de sorción (adsorción y desorción) generalizada para productos alimenticios.....	16
Figura 3. Cinco tipos de Isotermas de sorción (adsorción y desorción).....	18
Figura 4. Influencia de la temperatura en las isotermas de sorción .....	19
Figura 5. Diseño del estudio que se seguira en Evaluación de las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de las hojas de Sacha culantro ( <i>Eryngium foetidum</i> L.) .....	29
Figura 6. Etapas del acondicionamiento de hojas de sachá culantro durante el Tratamiento 1.....	33
Figura 7. Etapas del acondicionamiento de hojas de sachá culantro durante el Tratamiento 1.....	35
Figura 8. Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo GAB. ....	46
Figura 9. Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo BET .....	48
Figura 10. Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo Halsey .....	50
Figura 11. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo Peleg.....	52
Figura 12 Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo Oswin .....	54
Figura 13 Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo Henderson .....	56
Figura 14. Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo Caurie .....	58
Figura 15. Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las cuatro temperaturas de estudio .....	60

Figura 16. Valores del calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ) en función del contenido de humedad de equilibrio ( $X_e$ ).....	62
Figura 17. Valores de entropía diferencial para la adsorción en función del contenido de humedad de equilibrio ( $X_e$ ).....	64
Figura 18. Relación entre el calor isostérico ( $q_{st}$ ) y el cambio de entropía ( $\Delta S$ ) para la adsorción. ....	66
Figura 19. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo GAB .....	69
Figura 20. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las cuatro temperaturas de estudio según modelo Bet.....	70
Figura 21. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Halsey .....	72
Figura 22. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Peleg .....	74
Figura 23. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Oswin .....	76
Figura 24. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Henderson.....	78
Figura 25. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Oswin .....	80
Figura 26. Valores del calor isostérico de desorción ( $q_{st}$ ) en función del contenido de humedad de equilibrio ( $X_e$ ).....	82
Figura 27. Valores de entropía diferencial en función del contenido de humedad de equilibrio ( $X_e$ ).....	84
Figura 28. Relación entre el calor isostérico ( $q_{st}$ ) y el cambio de entropía ( $\Delta S$ ). ....	87

## **CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Descripción del problema**

A nivel mundial, en los últimos años, ha cobrado mayor relevancia la tendencia hacia una alimentación saludable, en el marco de una cultura de prevención de enfermedades a través del consumo de productos con compuestos bioactivos. En este contexto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) está promoviendo la investigación sobre la funcionalidad de diversos productos agrícolas que presentan potencial por su contenido de sustancias químicas, como antioxidantes, aplicables en los ámbitos alimentario y farmacológico.(Puente Vigo, 2019).

La Amazonía peruana se caracteriza por contar con productos nativos con un excelente potencial de uso en las industrias alimentaria, cosmética, farmacéutica, entre otras. Sin embargo, se conoce poco sobre las condiciones adecuadas para su procesamiento, almacenamiento y durabilidad. En particular, en la región de Madre de Dios se encuentra el sachaculantro (*Eryngium foetidum* L.), una especie también difundida en otras regiones del trópico, utilizada como condimento en la gastronomía y como planta medicinal. Se le atribuyen propiedades terapéuticas para tratar dolores de cabeza, gripe, malaria, diarreas, hemorragias, reumatismo, entre otros padecimientos debido a su alto contenido de antioxidantes. (Jaramillo et al., 2011).

El uso del sachaculantro fresco es limitado por su naturaleza perecedera, su alto contenido de humedad lo hace vulnerable al ataque de microorganismos, asimismo, en la industria alimentaria su forma seca no es común; por lo cual, es de gran importancia proporcionar los parámetros adecuados para un secado óptimo y establecer condiciones adecuadas de almacenamiento con la finalidad de preservar su calidad y funcionalidad.

El secado es uno de los procesos más utilizados para mejorar la estabilidad de los alimentos, ya que reduce significativamente la actividad de agua,

disminuye la actividad microbiana y enzimática, y minimiza las reacciones físicas y químicas que puedan contribuir al deterioro del alimento. (Russo et al., 2013). No obstante, durante el almacenamiento y secado de materiales biológicos, pueden ocurrir transformaciones indeseables tanto físicas como químicas y microbiológicas (Bensebia & Allia, 2016).

Por otro lado, las isotermas de sorción de varias plantas medicinales y aromáticas han sido reportadas en la literatura por diversos autores (Bensebia & Allia, 2016; Červenka et al., 2015; Kammoun Bejar et al., 2012; Martínez-Las Heras et al., 2014; Soysal & Oztekin, 1999); sin embargo se conoce poco acerca de las isotermas de sorción en el sachá culantro.

## **1.2. Formulación del problema**

Actualmente, tras la pandemia de COVID-19, las personas han tomado mayor conciencia sobre la importancia de mejorar su alimentación, optando por productos que ofrezcan diversos beneficios para la salud. Esto ha impulsado un crecimiento constante en la demanda de alternativas alimenticias naturales y el consumo de alimentos funcionales. El sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.), una planta nativa de la Amazonía, tiene múltiples usos tanto en la gastronomía como en la medicina tradicional. Su nombre, característico del Perú, sugiere que se trata de un culantro silvestre o de bosque. No obstante, los estudios sobre esta especie son recientes y aún muy limitados. (Castro-Alayo et al., 2019). Por otro lado, en el marco de la actual tendencia hacia una alimentación saludable, uno de los principales objetivos de la industria alimentaria es desarrollar productos funcionales, sin dejar de lado la extensión de su vida útil. En este sentido, el secado es una de las técnicas más empleadas, y podría ser aplicable al sachá culantro. Sin embargo, aún no se dispone de literatura científica que reporte datos sobre las isotermas de sorción de esta especie, el contenido de humedad de la monocapa, sus propiedades de sorción de humedad y características termodinámicas. Estos datos serían fundamentales para determinar las tecnologías y metodologías más adecuadas para el proceso de secado y asegurar una mayor estabilidad durante su almacenamiento. De acuerdo a la problemática explicada se formula la siguiente interrogante de investigación:

¿Cómo serán las isothermas de sorción (desorción y adsorción) de las hojas de sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.) a diferentes temperaturas y la humedad?

Y de acuerdo a esta pregunta general se derivan estas sub-preguntas:

¿Cuál es el modelo matemático más adecuado para describir las isothermas de sorción de las hojas de sachá culantro entre los modelos de isothermas comúnmente aplicados en alimentos?

¿Cuál es la humedad de la monocapa ( $X_m$ ) en la isothermas de sorción para las hojas de sachá culantro a través del modelo de GAB?

¿Cuáles son las propiedades termodinámicas de desorción y adsorción (entalpía diferencial, entropía diferencial, teoría de compensación entalpía-entropía) para las hojas de sachá culantro?

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Evaluar las isothermas de sorción (desorción y adsorción) de las hojas de sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.) a diferentes temperaturas y la humedad.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Modelar las isothermas de desorción y adsorción de las hojas de sachá culantro utilizando modelos de isothermas comúnmente aplicados en alimentos.
- Determinar la humedad de la monocapa ( $X_m$ ) en las isothermas de desorción y adsorción para las hojas de Sachá culantro a través del modelo de GAB.

- Determinar las propiedades termodinámicas de desorción y adsorción (entalpía diferencial, entropía diferencial, teoría de compensación entalpía-entropía) para las hojas de Sacha culantro.

## **1.4. Variables**

### **1.4.1. Variables Independientes:**

- Condiciones de almacenamiento (temperatura 35°, 45° y 55°, humedad relativa 11 %, 22%, 32%, 43%, 52%, 62%, 75%, 84% y 90%).

### **1.4.2. Variables dependientes:**

- Isotermas de sorción (modelado de isotermas de sorción)
- Propiedades físicas (contenido de humedad de equilibrio, contenido de humedad de la monocapa).
- Propiedades termodinámicas (entalpía diferencial, entropía diferencial, teoría de compensación entalpía-entropía).

## 1.5. Operacionalización de variables

Cuadro 1. Operacionalización de variables para las isothermas de sorción y propiedades termodinámicas de las hojas de sachá culantro.

T.V.*	Variables	Dimensiones	Indicador	Unidad de medida
VARIABLES INDEPENDIENTES	Condiciones de almacenamiento	Temperatura	Temperatura presente en el ambiente de almacenamiento: 35, 45 y 55°C	°C
		Humedad relativa	Humedad relativa presente en el ambiente de almacenamiento: 11%, 22%, 32%, 43%, 52%, 62%, 75%, 84%, 90 %	%
VARIABLES DEPENDIENTES	Isotermas de sorción	Modelado de isothermas de sorción	$r^2$ E (%)	Adimensional
	Propiedades físicas	Contenido de humedad de equilibrio	Humedad final presente en las muestras	g agua/g m.s.
		Contenido de humedad de la monocapa	Humedad adecuada presente en las muestras	g agua/g m.s.
	Propiedades termodinámicas	Entalpia diferencial	Cantidad de energía por masa	kJ/mol
		Entropía diferencial	Cantidad de energía por masa	kJ/mol K
		Teoría de compensación entalpia-entropía	Relación entalpia-entropía	0 a 1 (adimensional)

\* T.V.: Tipo de variable

**Fuente:** Elaboración Propia (2023).

## 1.6. Hipótesis

**H<sub>0</sub>:** La temperatura y la humedad relativa según las isothermas de sorción no tienen efectos influyentes en las condiciones de almacenamiento de las hojas de sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.).

**H<sub>1</sub>:** La temperatura y la humedad relativa según las isothermas de sorción tienen efectos influyentes en las condiciones de almacenamiento de las hojas de sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.).

### 1.7. Justificación

La identificación de las características de sorción de agua, el contenido de humedad y la actividad de agua crítica es útil para predecir la vida útil de un alimento y proponer metodologías adecuadas para su procesamiento y almacenamiento (Carvalho Lago & Noreña, 2015; Katz & Labuza, 1981).

Por otro lado, la tendencia de la actividad de agua y los requerimientos energéticos de transferencia de calor y masa en sistemas biológicos pueden estudiarse mediante un enfoque termodinámico (Fasina et al., 1999; Kaya & Kahyaoglu, 2007). Las funciones termodinámicas se calculan a partir de las isothermas de sorción de humedad, lo que permite interpretar los resultados experimentales de acuerdo con la teoría (Iglesias et al., 1976; Kaya & Kahyaoglu, 2007). Estas funciones incluyen la energía libre, el calor de vaporización (calor diferencial de sorción), entalpía integral y entropía integral. Dichos parámetros determinan el punto final al que debe deshidratarse un alimento para obtener un producto estable con un contenido óptimo de humedad, además de proporcionar la cantidad mínima de energía necesaria para eliminar una proporción determinada de agua. Las propiedades termodinámicas también brindan información sobre la microestructura de los alimentos y permiten la interpretación teórica de los fenómenos físicos que ocurren en la interfaz agua-alimento (Rizvi & Benado, 1983).

Por lo tanto, la determinación y evaluación de las “*isothermas de sorción y las propiedades termodinámicas*” de las hojas de sachá culantro adquieren suma importancia en el secado con el fin de optimizar el uso de energía e identificar las condiciones más apropiadas de procesamiento. Asimismo, estos datos son esenciales para la selección del material de empaque adecuado, considerando su permeabilidad, y para definir condiciones óptimas de almacenamiento que prolonguen su vida útil. (Paul et al., 2011).

Dada la composición química de esta especie vegetal, se identifica una prometedora oportunidad de ingresos económicos para los productores, ya

que las plantas aromáticas y medicinales proporcionan materia prima para las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica. (Soysal & Oztekin, 1999). Por consiguiente, la realización de la presente investigación está plenamente justificada.

### **1.8. Consideraciones éticas.**

La ética es un elemento central de la integridad científica, por lo cual, en la presente investigación se aplicaron los principios morales durante los ensayos, recolección y procesamiento de datos, redacción del informe de tesis. Por otra parte, los autores manifestamos nuestra franca intención de evitar perjudicar a las personas vinculadas a los elementos objeto de estudio y el resto de la sociedad, puesto que el propósito de esta investigación es contribuir con la sociedad proporcionando datos relevantes para el desarrollo de nuevas metodologías que promuevan la actividad económica agroindustrial del *sacha culantro*.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de estudio

**Bensebia & Allia, (2016)** realizaron el estudio titulado: “*Analysis of adsorption–desorption moisture isotherms of Rosemary leaves*” con el objetivo de determinar de manera experimental las “*isotermas de adsorción y desorción*” de las hojas de romero bajo 3 temperaturas controladas. Las variables evaluadas fueron la “*humedad de equilibrio*”, humedad de la monocapa y las propiedades termodinámicas tales como la entalpía diferencial, entalpía integral, entropía diferencial y entropía integral. Los resultados del estudio mostraron isotermas con un comportamiento de tipo II, según la clasificación de Brunauer, siendo el modelo GAB el que mejor se ajustó a las cifras experimentales. La “*humedad de la monocapa*” ( $X_m$ ) disminuyó con el aumento de la temperatura, tanto en las isotermas de adsorción (0,045 a 0,034 g agua/g m.s.) y desorción (0,093 a 0,055 g agua/g m.s.). El calor esotérico neto ( $q_{st}$ ) de adsorción y desorción fue de 0,85 a 26,86 kJ/mol y 1,77 a 47,37 kJ/mol respectivamente. Además, la teoría de compensación entalpía-entropía sugirió que el fenómeno de sorción es manejado por la entalpía. De esta forma, los autores concluyeron que el modelo GAB, se ajusta mejor a las características de sorción de humedad de las hojas de romero; asimismo, el estudio permitió concluir que la humedad de hojas de romero no debe ser mayor que el rango de 0,083–0,12 kg H<sub>2</sub>O/kg b.s. para asegurar la estabilidad microbiológica ( $a_w < 0,6$ ) de los productos. El proceso de secado de las hojas de romero debe realizarse considerando que el contenido de humedad se encuentre por debajo del rango de 0,034–0,090 kg H<sub>2</sub>O/kg b.s.

**Červenka et al., (2015)** realizaron el estudio denominado: “*Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of green and roasted Yerba mate (Ilex paraguariensis)*” que tuvo como objetivo la determinación de las isotermas de adsorción de humedad y las propiedades termodinámicas de la Yerba mate (*Ilex paraguariensis*) verde y tostada. Las variables evaluadas fueron: el agua adsorbida

como monocapa, multicapa, agua a granel, el “*calor isostérico neto*” y la “*entropía diferencial*” en el proceso de secado de la yerba mate verde y tostada. Los resultados del estudio denotaron que el modelo de GAB se adecuó de mejor forma a los datos experimentales para ambas muestras. Adicionalmente, se observó un decrecimiento de la “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ ) con el aumento de la temperatura para la muestra de yerba mate verde y un entrecruzamiento en las isotermas para las muestras de yerba mate tostada a 0,66 de  $a_w$ . La teoría de compensación entalpía-entropía sugirió que el fenómeno de sorción es manejado por la entalpía y es un proceso no espontáneo. Asimismo, los autores concluyeron que las diferentes propiedades del agua adsorbida pueden calcularse usando la ecuación de Curie (densidad del agua adsorbida, número de capas adsorbidas y área superficial de adsorción); por otra parte, el “*calor isostérico neto*” y la “*entropía diferencial*” disminuyeron con el aumento del contenido de humedad, lo que muestra que el agua adsorbida se encuentra altamente ligada a la superficie con bajo contenido de humedad para la yerba mate verde en comparación con la muestra de yerba mate tostada.

**Carvalho Lago & Noreña, (2015)** realizaron la investigación titulada: “*Thermodynamic analysis of sorption isotherms of dehydrated yacon (Smallanthus sonchifolius) bagasse*” con el objetivo de analizar las propiedades termodinámicas diferenciales e integrales de la entalpía y entropía de sorción del bagazo de Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) deshidratado. Las variables evaluadas fueron: la entalpía y entropía diferencial, además de la entalpía y entropía integral. Las “*isotermas*” fueron determinadas a las temperaturas de 20, 30, 40 y 50°C en un rango de  $a_w$  de 0,11 a 0,97. Los resultados del estudio mostraron que las isotermas tienen un comportamiento del tipo III. El modelo de Halsey fue el que mejor se adecuó a las cifras experimentales. La entalpía y entropía diferencial decreció con el incremento del contenido de humedad. A través de la teoría de compensación entalpía-entropía se observó que el proceso de adsorción fue controlado por la entalpía y no fue espontáneo ( $\Delta G > 0$ ). Finalmente, los autores concluyeron que los datos encontrados sobre las características de sorción y las propiedades termodinámicas del bagazo de yacón se pueden utilizar para estimar los requerimientos energéticos para procesos de deshidratación e intentar predecir la estabilidad del producto en anaquel.

**Pulla, (2011)** realizó la investigación titulada: “*Determinación de las isotermas de adsorción del ají (Capsicum annum L.) seco*” con el objetivo de determinar “*las*

*isotermas de adsorción del ají (Capsicum annum L.) seco*”, para tales efectos se analizaron las variables de “*humedad de equilibrio*”, “*humedad de la monocapa*”, el “*calor isostérico*” de adsorción y la “*energía de activación*” concerniente a las propiedades termodinámicas según el modelo de GAB. Las isotermas fueron determinadas a las temperaturas de 25, 35, 40°C en un rango de  $a_w$  de 0,11 a 0,85. En los resultados del estudio se puede apreciar que las “*isotermas*” tienen un comportamiento del tipo III y un comportamiento lineal de la humedad hasta una  $a_w$  de 0,5. Los modelos de GAB y Halsey fueron los que mostraron mejor ajuste a las cifras experimentales. La “*humedad de la monocapa*” mostró dependencia con la temperatura, disminuyendo de 0,085 a 0,071 g agua/g m.s.; mientras que el “*calor isostérico*” disminuyó con el aumento de la humedad de 23,64 a 0,0075 kJ/mol. El autor concluyó que la mayor estabilidad del ají seco en condiciones de almacenamiento se produce a una humedad cercana a 8.5% en b.s. considerando una humedad medioambiental máxima de 50% a temperaturas de acopio entre 25°C a 40°C.

**Pergher et al., (2016)** realizaron el estudio titulado: “*Parámetros Fisicoquímicos e Isotermas de Adsorción de Hojas de Especies Silvestres de Maytenus ilicifolia Martius*” con el objetivo de evaluar los parámetros fisicoquímicos y las “*Isotermas de adsorción*” de la especie evaluada. En este estudio, los autores trabajaron con las variables de humedad relativa (11,0 % a 80,3 %), humedad de equilibrio, y las temperaturas de secado (30°C a 60°C). Los resultados del estudio, demostraron que las “*isotermas de adsorción*” presentan un comportamiento de Tipo II, muy común en productos alimenticios vegetales, asimismo, los autores concluyeron que los datos experimentales encontrados se ajustan mejor al modelo GAB.

**García, (2014)** realizó la investigación titulada “*Evaluación de los efectos del proceso de secado sobre la calidad de la Stevia (Stevia rebaudiana Bertoni) y la Hierbabuena (Mentha spicata)*” con el objetivo de evaluar los efectos del secado en la calidad de las especies mencionadas. El autor trabajó con las variables: las “*isotermas de sorción*” y los parámetros óptimos de secado, para tales efectos, el autor trabajó con temperaturas de 20, 50 y 60°C para la Stevia rebaudiana y 20, 40 y 50°C en la Mentha spicata; asimismo, estimó el efecto de cuatro temperaturas experimentales para cada caso, 40, 50, 60 y 70°C para la Stevia rebaudiana y 30, 40, 50 y 60°C para la Mentha

spicata sobre la incidencia en su calidad, usando las siguientes variables respuesta: la microbiología, el cambio del color, y el contenido de aceites esenciales. Los resultados del estudio denotaron que el mejor ajuste a los datos experimentales se consiguió con el modelo de Oswin para el caso de la Stevia rebaudiana, mientras que para el caso de los datos obtenidos para la Mentha spicata se identificó con mejor ajuste al modelo de Peleg. Por otra parte, el autor concluyó que las temperaturas de 40 y 50°C son las más adecuadas a fin de conservar el color característico de ambas hierbas aromáticas, asimismo, se observó una notable inhibición del desarrollo mohos y levaduras a las temperaturas más altas de secado, y la temperatura de 40°C es la más ideal para la Mentha spicata porque en este tratamiento se evidenció una mejor conservación de la concentración de aceites esenciales; y en cuanto a la Stevia rebaudiana, el autor determinó que la temperatura ideal de secado es de 60°C.

**Heredia (2002)** realizó el estudio titulado: "*Deshidratación del Sacha Culantro (Eryngium foetidum L.), por flujo de aire caliente*", con el objetivo de determinar la incidencia de la velocidad de aire de secado y la temperatura en la difusividad del agua y la cinética de evaporación durante el secado del Sacha Culantro. El autor trabajó con dos variables: temperatura y velocidad del aire de secado, la primera bajo tres niveles experimentales de 40, 50 y 60°C y la segunda a tres velocidades 0.5, 0.8 y 1.1 m/s; estos parámetros fueron distribuidos en nueve tratamientos en estufa y secador solar. Los resultados del estudio evidenciaron la existencia de una relación inversa entre la velocidad, la temperatura del aire y el tiempo de secado, puesto que, a menor temperatura y menor velocidad, el tiempo de secado se incrementa, y a mayor velocidad de aire y mayor temperatura, el tiempo de secado disminuye; asimismo, en este estudio se logró determinar que el contenido de "*humedad*" presenta proporcionalidad directa con la velocidad de secado. Por otra parte, se estableció que a una temperatura de 40°C y velocidad de aire de 1.1 m/s, las hojas de sachaculantro deshidratadas presentaron mayor aceptabilidad sensorial. Finalmente, el autor concluyó que la velocidad de secado presenta variación directa con el contenido de humedad presente en las hojas de Sacha Culantro y el modelo matemático de Fick es el que presenta mejor nivel de ajuste de acuerdo a los datos experimentales obtenidos.

**Basilio-Atencio & Flores-Ayala, (2021)**, realizaron el estudio titulado: “*Optimización de parámetros para la deshidratación por lecho fluidizado del sachá culantro (*Eryngium foetidum L.*)*” con el objetivo de optimar velocidad del aire y la temperatura de deshidratación usando un secador de “*lecho fluidizado*” del sachá culantro usando la metodología de superficie de respuesta; para lo cual, los autores evaluaron las siguientes variables: parámetros de secado por medio de temperaturas experimentales, (50, 60 y 70 °C) y velocidad del aire de secado (3.9, 5.5 y 7.1 m/s) usando un secador de “*lecho fluidizado*”, adicionalmente, se midió la variable aceptabilidad sensorial. Los resultados del estudio reflejaron que tanto la temperatura como la velocidad presentaron influencia significativa en la humedad final ( $p < 0,05$ ). De la misma forma se determinó que los parámetros óptimos para la deshidratación de hojas de sachá culantro fueron temperatura de 67,1°C y 7,1 m/s de velocidad, bajo esos parámetros, la humedad final obtenida fue de 0,12 g agua/g m.s., en un periodo de 180 minutos, considerando que la humedad inicial fue 88.76%  $\pm$  0,68 %. Finalmente, los autores concluyeron que no existe incidencia significativa de los factores de deshidratación en la actividad antioxidante ( $p > 0,05$ ) ni en la evaluación sensorial ( $p > 0,05$ ).

**Tafur, (2018)** realizó el estudio titulado “*Modelamiento de la cinética de secado de las hojas de sachá culantro (*Eryngium foetidum L.*) por convección forzada*” con el objetivo de realizar el “*modelamiento de la cinética de secado*” de las hojas de sachá culantro mediante “*convección forzada*”; así, la variable de estudio fue el modelamiento de la cinética de secado de las hojas de sachá culantro mediante “*convección forzada*”; evaluada por medio de 15 ensayos cada uno con 3 repeticiones a las temperaturas experimentales de 30, 40, 50, 60 y 70 °C y velocidades de 1,5, 2,0 y 2,5 m/s de aire de secado, los datos obtenidos fueron ajustados a doce modelos matemáticos empíricos mediante regresión no lineal. Los resultados del estudio demostraron que la humedad de las hojas disminuye considerablemente al incrementarse el tiempo de secado, asimismo, el modelo de Midilli logró destacar entre doce modelos matemáticos utilizados con un coeficiente de determinación  $R^2$  y la difusividad efectiva de la humedad alcanzó rangos de 10-11 a 10-9 y la energía de activación fue de 53,365, 58,709 y 55,316 kJ/mol a velocidades de aire de secado de 1,5, 2,0 y 2,5 m/s en cada caso, superior a 0,99 en todos los experimentos. Finalmente, el autor concluyó que el fenómeno de transferencia de

humedad se puede explicar mediante la difusión, puesto que las difusividades efectivas obtenidas se encontraban muy cerca a las de otros alimentos demostrándose la dependencia entre la difusividad efectiva y la variación de la humedad.

## **2.2. Marco teórico**

### **2.2.1. Plantas aromáticas**

El uso de plantas aromáticas y especias se remonta a tiempos anteriores a Cristo en el Medio Oriente siendo valoradas por su sabor, propiedades conservantes y medicinales. Por ejemplo, la mejorana era conocida por los antiguos egipcios, griegos y romanos. De hecho, los griegos consideraban que la mejorana era un símbolo de felicidad. En los últimos años, a nivel global, la demanda de plantas aromáticas ha aumentado debido a que son una fuente importante de antioxidantes naturales. (Roby et al., 2013).

Las hierbas aromáticas son fuentes de fibra, proteínas aceites esenciales, vitaminas (A, C y complejo B), minerales (sodio, fosforo, calcio, potasio y hierro), compuestos bioactivos tales como importantes antioxidantes, compuestos antivirales y bactericidas. En este último grupo, los compuestos fenólicos son uno de los principales grupos que contribuyen a las propiedades de las plantas aromáticas, incluida la prevención de las enfermedades cardiovasculares y el cáncer. Aunque las plantas aromáticas se consumen en pequeñas cantidades, no se puede ignorar el impacto biológico de su ingesta (Costa et al., 2015)

Por otro lado, las plantas aromáticas y medicinales proporcionan la materia prima para las industrias cosmética, alimentaria, y farmacéutica para producir especias, aceites esenciales y medicamentos (Öztekin et al., 1999).

### **2.2.2. Sacha culantro (*Eryngium foetidum* L.)**

El Sacha culantro (Figura 1), es una hierba originaria de América Tropical y las Indias Occidentales, donde es usada como alimento y medicina. Se ha domesticado y a

menudo se cultiva en el Sur de Asia, las Islas del Pacífico, África Tropical y las partes más cálidas del sur de Europa (Paul et al., 2011; Souza, 2016).

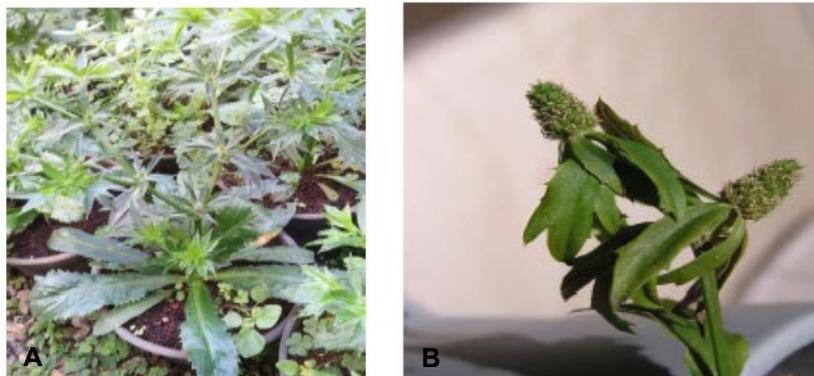


Figura 1. Sacha culantro (*Eryngium foetidum* L.): (A) aspectos generales de la especie; (B) inflorescencia.

**Fuente:** Souza (2016).

El sachá culantro es una hierba tropical bianual de fuerte olor, que crece mejor en condiciones húmedas, en campos abiertos o pastizales. Sus raíces son carnosas y los tallos son solitarios, frecuentemente ramificados. Toda la planta es glabra. Las hojas son oblanceoladas, con márgenes dentados, miden entre 8 y 20 cm de largo y crecen en un patrón de roseta basal. La inflorescencia blanquecina se produce en brotes largos (30–50 cm), formando un césped apical visible. Su fruto es globoso u ovoidal, y está cubierto de protuberancias redondeadas de 1 a 2 mm de largo. (Paul et al., 2011)

#### 2.2.2.1. Clasificación taxonómica

El Sachá culantro fue clasificado taxonómicamente por Linné, (1753) de la siguiente forma:

**División:** Magnoliophyta

**Clase:** Magnoliopsida

**Sub-clase:** Rosidae

**Orden:** Araliales

**Familia:** Apiaceae

**Género:** *Eryngium*

**Especie:** *Eryngium foetidum* L.

### Usos tradicionales

Tradicionalmente, las hojas de sachaculantro se utilizan para tratar fiebres, escalofríos, vómitos, diarrea, neumonía, gripe, diabetes, estreñimiento y malaria. Tanto las hojas como las raíces se emplean en forma de té para estimular el apetito, mejorar la digestión, combatir los cólicos, aliviar los dolores estomacales y eliminar los gases. Los extractos de las hojas suprimen los mediadores proinflamatorios, lo que sugiere que la planta podría reducir el riesgo de cáncer asociado con la inflamación. Además, las hojas de sachaculantro son ricas en fósforo, potasio y micronutrientes dietéticos, lo que sugiere su uso en la fortificación de alimentos. (Sáenz et al., 1997; Singh et al., 2011; Zainol et al., 2005).

### Composición química de la hoja de Sachaculantro

Según Heredia, (2002) la composición química de las hojas de Sachaculantro frescas y secas es como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición Química de las hojas de Sachaculantro frescas y secas

Constituyente	Porcentajes en Hojas	
	Frescas	Secas
Humedad	87,00	8,02
Cenizas	1,84	14,46
Grasas	0,23	1,74
Proteínas	2,50	15,04
Fibras	0,87	12,63
Carbohidratos Totales	7,56	48,11

Fuente: Heredia, (2002)

### 2.2.3. Isotermas de sorción

Las "isotermas de sorción" son representaciones gráficas de la relación entre el contenido de agua de un alimento y su actividad de agua ( $a_w$ ) a una temperatura constante. Dado que la reducción de la actividad de agua es una de las metodologías más comunes para preservar la calidad de los alimentos, alcanzando niveles lo suficientemente bajos para inhibir el crecimiento

bacteriano, la determinación de las "isotermas de sorción" es crucial para estimar los límites de humedad adecuados que eviten la proliferación microbiana y la producción de micotoxinas durante el periodo de almacenamiento. Además, las características de sorción son fundamentales para el diseño, modelado y optimización de los procesos de secado de alimentos. (Gálvez et al., 2006). Las "isotermas de sorción" se dividen en isotermas de adsorción e isotermas de desorción como se muestra en la Figura 2 (Al-Muhtaseb et al., 2002).

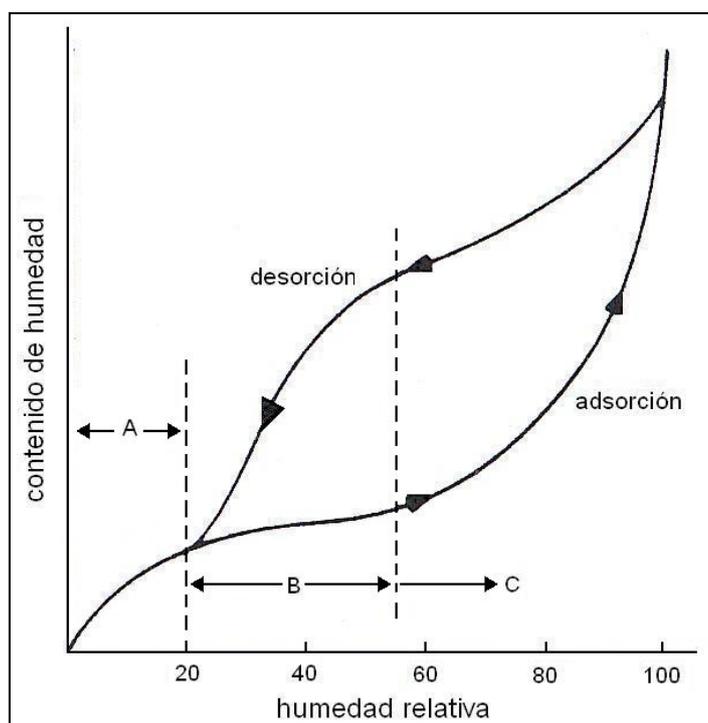


Figura 2. Isotermas de sorción (adsorción y desorción) generalizada para productos alimenticios.

**Fuente:** Al-Muhtaseb, McMinn & Magee (2002).

En la Figura 2. podemos observar una diferencia entre las curvas de adsorción y desorción que se conoce como "histéresis", y se presenta bajo la influencia de factores físicos como son los probables diferencias en la constitución física del material, la condensación capilar, cambios de fase, la presencia de impurezas en la superficie, fenómenos comunes en materiales altamente higroscópicos (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Estudiando específicamente a los alimentos, las isoterms se reparten en tres zonas (Figura 2) A, B y C. En la primera zona (A), denominada monocapa, las moléculas de agua están ligadas energicamente a áreas específicas del sólido, comúnmente, estas zonas se caracterizan por la presencia de grupos hidroxilo propios de los carbohidratos de elevado peso molecular, aminos y carboxilos presentes en proteínas, unidos por medio de fuerzas ion-dipolo y puentes de hidrógeno. Por lo tanto, esta agua no se encuentra disponible como solvente para procesos biológicos y no contribuye al desarrollo microbiano. En la segunda zona (B) el agua se presenta en multicapas, por lo cual se halla menos unida al material se presenta en pequeños capilares y constituye un agua de mayor disponibilidad; finalmente, en la zona C el agua se halla suelta en capilares grandes, puede formar soluciones y se cataloga como agua libre. (Al-Muhtaseb et al., 2002).

#### **2.2.3.1. Clasificación de las isoterms de sorción**

Las isoterms se clasifican en cinco tipos de comportamiento mostrados en la Figura 3. Para el caso específico de alimentos ricos en moléculas hidrosolubles cristalinas tales como hidratos de carbono o sales, generalmente, las isoterms tienen una apariencia cóncava (Tipo III), y en el caso de los demás alimentos son comunes las isoterms de apariencia sigmoidea (Tipo II), el punto de inflexión de la isoterma de Tipo II es un indicio del cambio de la disposición de ligar agua y nos da idea de las cantidades relativas de agua unida y libre. Las isoterms de Tipo I son comunes para sólidos porosos no hinchable, como silicatos antiaglomerantes (Basu et al., 2006).

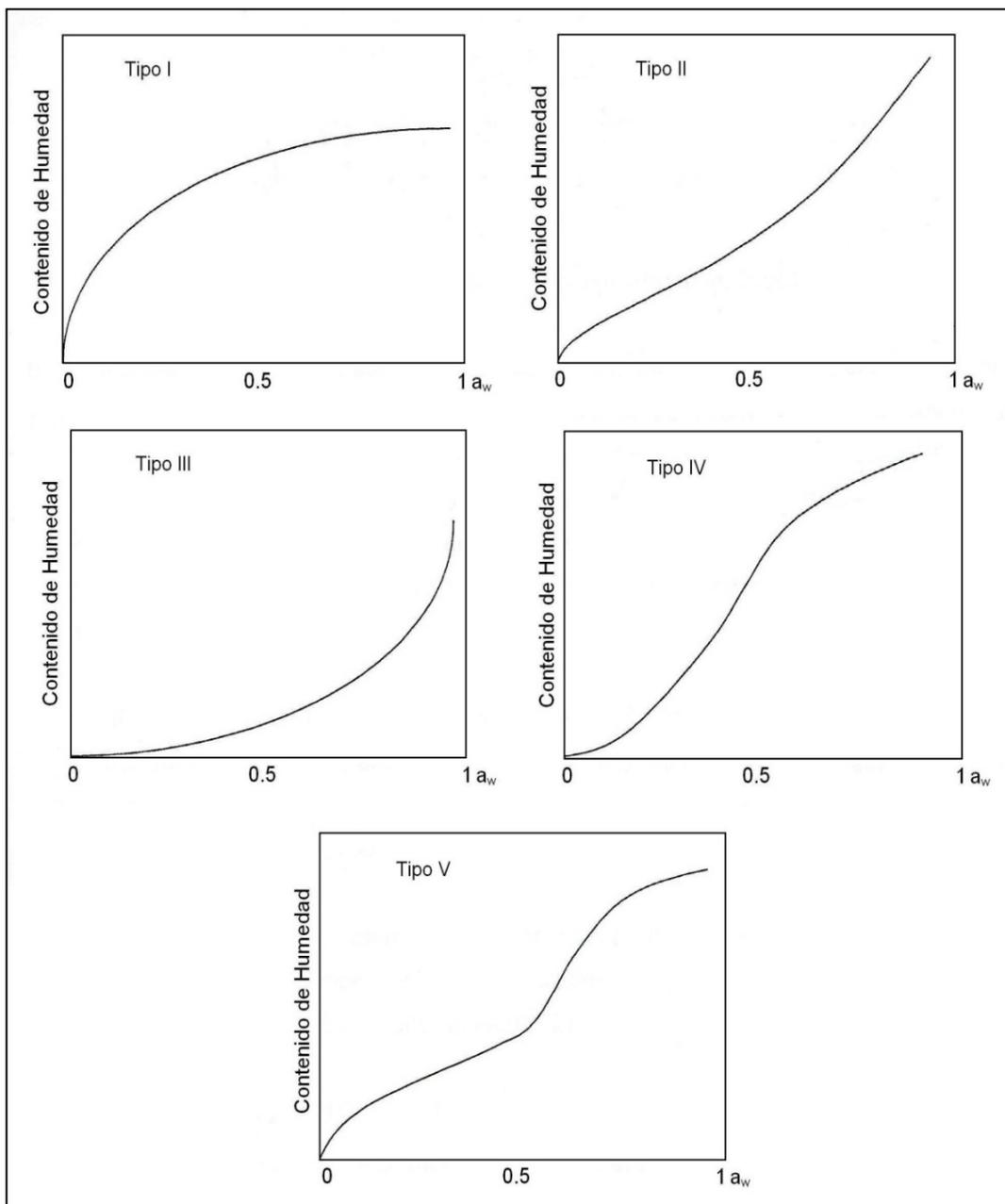


Figura 3. Cinco tipos de Isotermas de sorción (adsorción y desorción).

**Fuente:** Basu, Shivhare, & Mujumdar (2006).

### 2.2.3.2. Efecto de la temperatura en las isotermas de sorción

La temperatura en el estudio de las isotermas de sorción para alimentos es un factor de gran importancia porque un alimento constituye una mezcla compleja cuya actividad de agua cambia de acuerdo a la temperatura. Asimismo, se debe considerar que la temperatura incide directamente en la circulación de las moléculas de agua y afecta la estabilidad entre la fase de vapor y la fase

absorbente. Un incremento de la temperatura, a una “*actividad de agua*” constante, desencadena la disminución de la cantidad de agua adsorbida. Excepcionalmente, ciertos azúcares de baja masa molecular presentes en diversos alimentos, tienen alta solubilidad en agua y se tornan más “*higroscópicos*” a mayores temperaturas. Por otra parte, la “*reactividad química*” y la actividad de los microorganismos están estrechamente influenciadas por la relación entre la temperatura y la concentración de humedad, debido a que un incremento de temperatura produce que la actividad de agua aumente manteniendo el contenido de humedad constante (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Generalmente, la actividad de agua ( $a_w$ ) se incrementa cuando aumenta la temperatura, lo mismo sucede con la presión de vapor; esta tendencia se puede observar en la Figura 4 (Al-Muhtaseb et al., 2002).

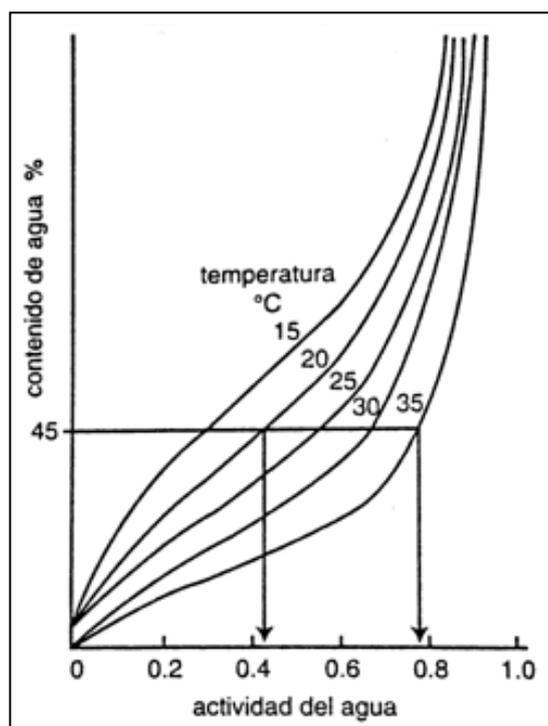


Figura 4. Influencia de la temperatura en las isotermas de sorción.

Fuente: Al-Muhtaseb, McMinn & Magee (2002).

### 2.2.3.3. Modelamiento de las “isotermas de sorción”

La descripción de las “isotermas de sorción” en productos alimenticios involucra utilizar “modelos matemáticos” cuya finalidad es moldear las curvas de sorción usando planteamientos teóricos, semiempíricos y empíricos. No obstante, ninguno de los modelos es totalmente aplicable para todos los alimentos y los diferentes rangos de actividad de agua debido a que la humedad de sorción de las isotermas en alimentos es producto de la integración de las propiedades higroscópicas de sus múltiples componentes; así, un declive de la actividad de agua se produce por la acción de diversos parámetros, que pueden ser predominantes o no bajo diversos rangos de actividad de agua. Por lo general, la temperatura no es considerada explícitamente en los modelos de las isotermas porque se asume como un parámetro constante, empero, su estudio no deja de ser importante ya que sus efectos en las isotermas nos llevan a calcular el “calor isostérico de sorción”. En tal sentido, los modelos matemáticos que intentan describir las “isotermas de sorción” están planteados para relacionar la humedad de un material con la humedad relativa de equilibrio del ambiente (Al-Muhtaseb et al., 2002). A continuación, se presentan los modelos más comunes:

- **Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer)**

El “modelo de GAB” es muy común en alimentos y es recomendado por “el proyecto europeo COST 90”, que trata sobre propiedades físicas en alimentos. El modelo de GAB es reconocido porque se utiliza para niveles de actividad de agua cercanos a 0,9 y brinda un mejor ajuste de datos que la ecuación de BET en un amplio rango de contenido de humedad. El modelo GAB se expresa con las siguientes ecuaciones:

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

$$C = c \exp \left[ \frac{H_m - H_n}{R T} \right] \quad (2)$$

$$C = k \exp \left[ \frac{H_p - H_n}{R T} \right] \quad (3)$$

Donde:

- $X_e$  = Contenido de agua en equilibrio.
- $X_m$  = Humedad en la monocapa (kg agua/kg ss.)
- $C, K$  = Constantes del modelo.
- $H_m,$  = Calor de sorción de la monocapa y multicapa  
 $H_n$  respectivamente (kJ/mol).
- $H_p$  = Calor de condensación del vapor de agua a una  
temperatura dada (kJ/mol).
- $c, k$  = Son los factores de acomodación entrópica.
- $R$  = Constante universal de los gases (kJ/mol K).
- $T$  = Temperatura (K).

#### ▪ Modelo de BET (Brunauer, Emmet y Teller)

El modelo de BET es aplicable a la sorción en multicapa bajo actividades de agua entre 0,1 y 0,5, y se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$X_e = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)(1 + a_w(C - 1))} \quad (4)$$

$$C = K \exp \left[ \frac{Q_s}{R T} \right] \quad (5)$$

Donde:

- $C$  = Constantes del modelo.
- $K$  = Constante, normalmente se asume que vale 1.
- $Q_s$  = Calor isostérico de sorción (kJ/kg).

- **Modelo de Halsey**

El “*modelo Halsey*” es comúnmente usado para estudiar “*isotermas de sorción*” en alimentos con alto contenido de almidón, tales como la papa, el maíz, y el trigo, cuyos valores de  $a_w$  están entre 0,1 a 0,8. Por otro lado el modelo de Halsey, proporciona una ecuación que abarca la condensación de las multicapas de agua a distancias relativamente altas de la superficie del material.

$$a_w = \exp \left[ \frac{-A}{X_e^B} \right] \quad (6)$$

Siendo A, B constantes de la ecuación y  $X_e$  la humedad de equilibrio.

- **Modelo de Oswin**

Este modelo es comúnmente usado para “*isotermas de sorción*” de diferentes tipos de alimentos. Los parámetros A y B del “*modelo de Oswin*” muestran relación con la temperatura para diferentes isotermas.

$$X_e = A \left[ \frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B \quad (7)$$

Siendo A y B las constantes características en el modelo de Oswin.

- **Modelo de Henderson**

El “*modelo de Henderson*” propuesto en el año 1952, es uno de los modelos más usados en alimentos como cereales, granos y frutas debido a que presenta un amplio rango de “*actividad de agua*” de 0,1 a 0,7 y presenta la siguiente ecuación:

$$1 - a_w = \exp(-kX_e^n) \quad (8)$$

Donde  $k$  y  $n$  son las constantes en el “*modelo de Henderson*” y  $X_e$  la humedad de equilibrio.

- **Modelo de Caurie**

Se utiliza comúnmente para granos y cereales, permite estimar con cierta precisión la humedad de equilibrio en función de la temperatura bajo rangos de 20 a 90% de humedad relativa. Presenta la siguiente ecuación:

$$x_w = \exp \left[ (a_w) \cdot \ln(v) - \frac{1}{4,5 \cdot x_s} \right] \quad (9)$$

#### 2.2.3.4. Propiedades termodinámicas

- **Entalpia diferencial de sorción**

La entalpia diferencial es un factor muy útil para analizar los fenómenos de “*adsorción y desorción de agua*”; al deshidratar un alimento, este parámetro representa a la energía necesaria para romper las interacciones entre las moléculas de vapor de agua y la superficie del adsorbente; asimismo, en los procesos de adsorción de agua, representa a la energía requerida para que suceda lo inverso. El conocimiento de la entalpia diferencial en relación a la humedad de equilibrio, es importante en las investigaciones de secado y almacenamiento de productos vegetales, es útil para estimar los requerimientos energéticos del proceso de secado y predecir el estado del agua en el material estudiado. Matemáticamente, el valor de la entalpia diferencial ( $\Delta H_d$ ) se calcula restando el calor total de adsorción de agua del alimento ( $Q_{st}$ ) del calor de vaporización de agua pura ( $\Delta H_{vap}$ ), a una temperatura definida como se muestra en la Ecuación 10. (Basu et al., 2006).

$$\Delta H_d = Q_{st} - \Delta H_{vap} \quad (10)$$

Donde:

$\Delta H_d$  = Entalpia diferencial (kJ/mol).

$Q_{st}$  = Calor isostérico total de sorción (kJ/mol).

$\Delta H_{vap}$  = Calor de vaporización del agua pura (kJ/mol).

Por otra parte, el calor isostérico neto de sorción, se determina mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron (Basu et al., 2006):

$$\Delta H_d = -R \frac{d \ln a_w}{d(1/T)} \quad (11)$$

Donde:

$a_w$  = Actividad de agua

$T$  = Temperatura absoluta, (K)

$\Delta H_d$  = Entalpía diferencial (kJ/mol).

$R$  = Constante universal de los gases, 8,314 kJ/kmol K, siendo para el vapor de agua 0,4619 kJ/mol K.

El estudio de la relación de la  $\Delta H_d$  en función del contenido de humedad es importante para entender varios procesos en alimentos, es un parámetro útil para estimar los requerimientos energéticos del secado, además de que nos facilita datos significativos del estado del agua en los alimentos. De esta forma, que utiliza la siguiente relación exponencial empírica entre la  $\Delta H_d$  y el contenido de humedad de frutas secas: (TSAMI et al., 1990):

$$\Delta H_d = \Delta H_0 \exp(-X_e/X_0) \quad (12)$$

Donde:

$\Delta H_0$  = Entalpía diferencial 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 alimento (g agua/g m.s.).

## **2.4. Definición de términos**

### **2.4.1. Actividad de agua ( $a_w$ )**

La “*actividad de agua*” ( $a_w$ ) es un factor que representa el grado de disposición de agua en un alimento necesaria para que sucedan diversos procesos bioquímicos tales como reacciones enzimáticas, oxidación de lípidos, reacción de Maillard, proliferación bacteriológica entre otros. En tal sentido, su estudio es importante porque nos permite estimar el tiempo de vida de un alimento manteniendo sus principales características (Gálvez et al., 2006).

### **2.4.2. Isotermas de sorción**

Son representaciones gráficas que vinculan el contenido en humedad de equilibrio con la “*actividad de agua*” de un determinado material a una temperatura constante. El estudio de las isotermas es trascendental para el análisis, diseño e innovación de los mecanismos de procesamiento de alimentos, condiciones de almacenamiento, estimar posibles variaciones en la estabilidad de los productos alimenticios y en la selección de los materiales de envasado más adecuados (Gálvez et al., 2006).

### **2.4.3. Entalpía diferencial**

En la deshidratación de alimentos, describe a la energía necesaria para romper las interacciones entre las “*moléculas de vapor de agua*” y la superficie del adsorbente. En la adsorción de agua representa a la energía requerida para que ocurra lo contrario. (Gálvez et al., 2006)

### **2.4.4. Energía de activación**

Es la energía requerida para juntar o separar la primera monocapa de agua entre el sistema sólido-agua, donde el fenómeno de adsorción necesita mayor energía que

romper tal unión (desorción). Así, la energía de activación se puede calcular mediante la ecuación de Arrhenius (Gálvez et al., 2006).

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. Tipo de estudio

La presente investigación, “Evaluación de las isotermas de sorción de las hojas de Sacha culantro (*Eryngium foetidum* L.)” es un “estudio correlacional”, las investigaciones de tipo correlacional están destinadas a conocer la relación o nivel de asociación existente entre dos o más variables de estudio.

### 3.2. Diseño del estudio

El diseño de la presente investigación es experimental, según Hernández-Sampieri, (2019), los estudios experimentales se caracterizan por la posibilidad de manipulación de variables con la finalidad de obtener resultados de acuerdo a los objetivos planteados. En ese sentido, se planteó la secuencia mostrada en la Figura 5. Comenzamos con la obtención del material de estudio, el Sacha culantro (*Eryngium foetidum* L.), el mismo que fue sometido a un acondicionamiento previo obteniéndose dos tipos de muestras, una muestra de hojas de Sacha culantro frescas y otra de hojas de Sacha culantro secas, ambas pasaron por análisis fisicoquímico para conocer sus principales constituyentes.

Posteriormente las muestras por triplicado (una por vez), fueron acondicionadas en ambientes con diferentes humedades relativas, seguidamente, fueron colocadas en una incubadora a las diferentes temperaturas de trabajo (obteniéndose de esa manera las isotermas de sorción experimentales). Las muestras se pesaron cada 48 horas en una “*balanza analítica*” hasta que su estabilidad, alcanzando su “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ ), asimismo, la determinación de humedad se llevó a cabo a 105°C. Acabado el proceso anterior, se realizó el ajuste matemático de las cifras experimentales con modelos de isotermas comúnmente utilizados en

alimentos. Luego la calidad de ajuste fue evaluada mediante “*el coeficiente de determinación*” ( $R^2$ ), el desvío porcentual medio (P) y el “*error estándar de humedad*” (SEM). El contenido de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) fue obtenida a partir del modelo de GAB, ajustado anteriormente. Finalmente, determinamos qué modelo se ajusta mejor las cifras experimentales de las isothermas, con ello podemos estimar los cálculos de las propiedades termodinámicas del material estudiado.

## FLUJOGRAMA

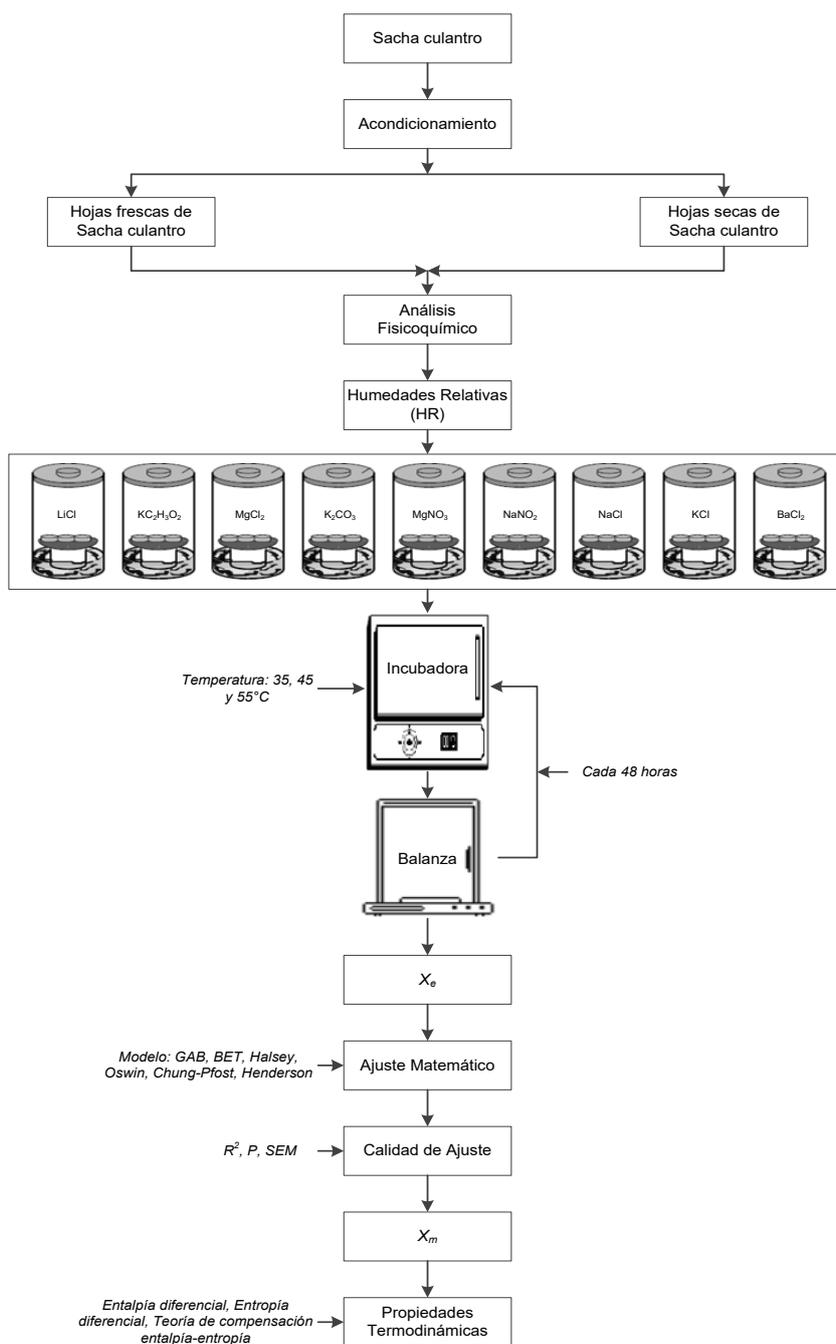


Figura 5. Diseño del estudio para la Evaluación de las isothermas de sorción y las propiedades termodinámicas de las hojas de Sacha culantro (*Eryngium foetidum* L.).

## **3.2. Población y muestra**

### **3.2.1. Población**

La población está constituida por hojas de Sacha culantro comercializadas en la Feria de Productores de la ciudad de Puerto Maldonado.

### **3.2.2. Muestra**

Se realizó un muestreo no probabilístico o muestreo dirigido, cuyo criterio de selección estuvo orientado por las características de la investigación, más que por un criterio estadístico de generalización. En ese sentido, se compraron 7 Kg de hojas de sachá culantro, se procedió a la selección, eliminándose hojas deterioradas por el sol y/o insectos, luego se obtuvo una muestra de 4 kg.

## **3.3. Métodos y técnicas**

### **3.3.1. Materiales y equipos**

#### **3.3.1.1. Lugar de ejecución**

El presente estudio fue realizado en las instalaciones de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD), específicamente en el Laboratorio de Procesos Agroindustriales perteneciente a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial y en el Laboratorio de Química perteneciente al Departamento de Ciencias Básicas. Mientras que el análisis proximal de las muestras fue realizado en el Laboratorio de Análisis Químico de la Universidad Agraria de la Molina.

#### **3.3.1.2. Materia prima**

La materia prima fue el Sacha culantro (*Eryngium foetidum* L.) obtenido de los productores agrícolas del capo ferial de la ciudad de Puerto Maldonado.

### 3.3.1.3. Reactivos

- Cloruro de Litio (LiCl), marca: Scharlau Chemie S.A.
- Acetato de Potasio (CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>K) marca: Productos Químicos. Monterrey, S.A.
- Cloruro de Magnesio (MgCl<sub>2</sub>), marca: Scharlau Chemie S.A.
- Carbonato de Potasio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), marca: Ciencia y Técnica S.R.L.
- Nitrato de Magnesio Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, marca: Scharlau Chemie S.A.
- Nitrato de Sodio (NaNO<sub>2</sub>), marca: HiMedia Laboratorios, S.A.
- Cloruro de Sodio (NaCl). marca: Scharlau Chemie S.A.
- Cloruro de Potasio (KCl), marca: Scharlau Chemie S.A.
- Cloruro de Bario (BaCl<sub>2</sub>), marca: Scharlau Chemie S.A.

### 3.3.1.4. Equipos

- Estufa, marca TOMOS, modelo ODHG-9053A. T°: 0-200°C, precisión ± 1°C.
- Incubadora, marca MEMMERT, modelo INB-400, T°: 0-70°C.
- Balanza analítica, marca OHAUS ADVENTURER, modelo AR 2140, rango: 0-210 g., precisión: ±0.0001 g.
- Balanza de precisión, marca GEHAK, rango: 0.2 g – 6100 g. precisión ±0.1 g.
- Cámara digital, marca PANASONIC, modelo LUMIX DMC-LS80.

### 3.3.1.5. Materiales

- Frascos de vidrio con tapa hermética.
- Pesa filtros de una capacidad de 15 mL, marca KIMBLE USA.
- Recipientes de plástico (Táper) de 680 ml, marca M&R.
- Termómetro de mercurio (rango: 0-100°C).
- Probeta de 100±1 ml., marca: GIARDINO Italy.
- Piceta con agua destilada.
- Bandejas de malla metálica.
- Pinzas.
- Espátulas.
- Jeringa descartable de 5 ml.
- Guantes quirúrgicos.

- Mascarillas.
- Bolsas de polietileno.
- Campana desecadora.
- Lentes de seguridad, marca KAMASA.
- Marcador permanente, marca Faber Castell.

### 3.3.1.6. Soluciones químicas de limpieza y desinfección

- Hipoclorito de sodio al 7.5%.
- Alcohol etílico de 96°, Laboratorios LA COPPER S.A.C.
- Formol al 40%, Laboratorios LA COPPER S.A.C.

### 3.3.3. Metodología

#### 3.3.3.1. Caracterización de la materia prima

Se realizó el análisis fisicoquímico de las muestras de hojas de Sacha culantro frescas y hojas de Sacha culantro secas, con la finalidad de determinar sus principales componentes. Los análisis fueron realizados por triplicado y están constituidos por:

- **Humedad:** Mediante el método de estufa, a presión atmosférica a 105°C hasta peso constante (AOAC, 1990).
- **Proteína:** Mediante el método semi micro kjeldhal (AOAC, 1990); el porcentaje de nitrógeno se multiplicó por el factor 6.25.
- **Grasa total:** Mediante extracción con éter di etílico como solvente mediante el método soxhlet (AOAC, 1990).
- **Ceniza Total:** Mediante calcinación de la muestra en una mufla, a 550°C por 4 horas (AOAC, 1990).
- **Carbohidratos:** Mediante diferencia (AOAC, 1990).

### 3.3.3.2. Acondicionamiento de las muestras

El acondicionamiento de las hojas de Sacha culantro se realizó bajo dos tratamientos. En ambos tratamientos se realizaron las operaciones de selección, limpieza y desinfección, sin embargo, en el tratamiento 1 se realizó la operación de oreo a temperatura de ambiente; y, en el tratamiento 2 se realizó el secado en estufa (Figuras 6 y 7).

#### FLUJOGRAMA DEL TRATAMIENTO 1:

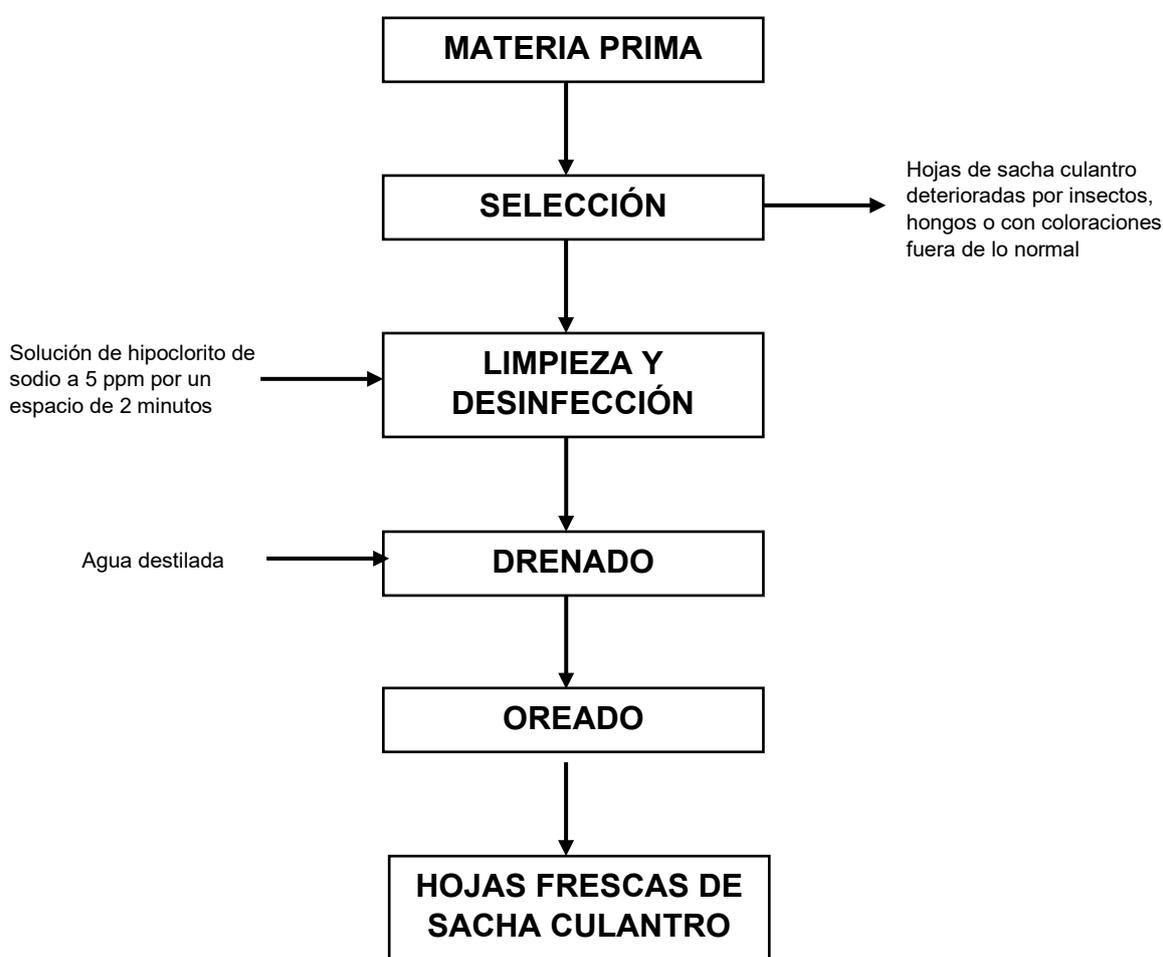


Figura 6. Etapas del acondicionamiento de hojas de sachá culantro durante el Tratamiento 1.

Las operaciones para el acondicionamiento realizadas en el tratamiento 1 se detallan a continuación:

- **Selección:** La selección de las hojas de sachá culantro se llevó a cabo desechando aquellas que presenten deterioro, estén comidas por insectos, presenten hongos y decoloraciones que evidencien otras afecciones que puedan sesgar los resultados de la investigación.
- **Limpieza y desinfección:** Las hojas de sachá culantro fueron lavadas con abundante agua corriente a temperatura ambiente para luego pasar a un proceso de desinfección utilizando una solución de hipoclorito de sodio a 5 ppm por un espacio de 2 minutos.
- **Drenado:** Después la desinfección, las hojas de sachá culantro pasaron por un breve drenaje con agua destilada para quitar los restos que pudieran quedar de la solución de hipoclorito de sodio.
- **Oreado:** Las hojas de sachá culantro fueron llevadas a orear bajo sombra a temperatura ambiente por espacio de 15 minutos para luego secarse con papel toalla.

## FLUJOGRAMA DEL TRATAMIENTO 2:

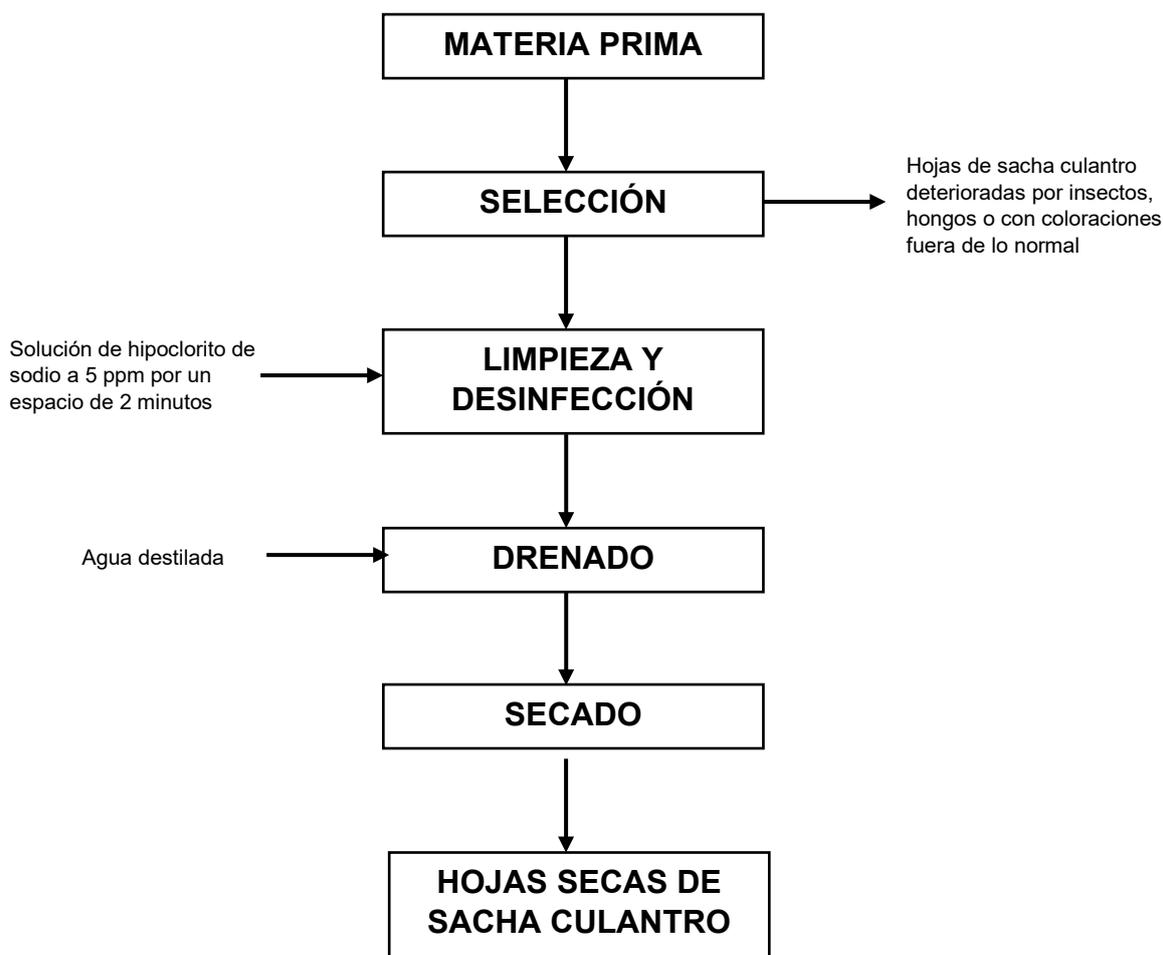


Figura 7. Etapas del acondicionamiento de hojas de sachaculantro durante el Tratamiento 1.

Asimismo, las operaciones para el acondicionamiento de las muestras en el tratamiento 2 se detallan a continuación:

- **Selección:** La selección de las hojas de sachaculantro se llevó a cabo desechando aquellas que presenten deterioro, estén comidas por insectos, presenten hongos y decoloraciones que evidencien otras afecciones que puedan sesgar los resultados de la investigación.
- **Limpieza y desinfección:** Las hojas de sachaculantro fueron lavadas con abundante agua corriente a temperatura ambiente para luego pasar a un proceso de desinfección utilizando una solución de hipoclorito de sodio a 5 ppm por un espacio de 2 minutos.

- **Drenado:** Después la desinfección, las hojas de sachá culantro pasaron por un breve drenaje con agua destilada para quitar los restos que pudieran quedar de la solución de hipoclorito de sodio.
- **Secado:** El secado de las hojas de sachá culantro se llevó a cabo en una estufa a una temperatura de 40°C hasta peso constante.

### 3.3.3.3. Obtención de las isotermas de sorción

Para estructurar las “*isotermas de sorción*” (desorción y adsorción), se utilizó el “*método estático gravimétrico*” (Gabas et al., 2009). Las humedades relativas se obtuvieron mediante soluciones salinas saturadas que cubren un rango de actividad de agua ( $a_w$ ) de 0,11 a 0,85, las cuales fueron estimadas por medio de ecuaciones de regresión presentadas en la Tabla 2 (LABUZA et al., 1985). Las sales y correspondientes humedades relativas a las temperaturas de estudio se muestran en la Tabla 3.

Las isotermas experimentales de sorción (desorción y adsorción) se determinaron a temperaturas de 35, 45 y 55°C, para obtener las humedades de equilibrio de cada muestra.

Tabla 2. Sales y ecuaciones de regresión utilizadas para obtener una  $a_w$  a una determinada temperatura (K).

Sales	Formula	Ecuación de regresión	$r^2$
Cloruro de Litio	(LiCl)	$\ln a_w = (500,95 \ 1/T) - 3,85$	0,976
Acetato de Potasio	(CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> K)	$\ln a_w = (861,39 \ 1/T) - 4,33$	0,965
Cloruro de Magnesio	(MgCl <sub>2</sub> )	$\ln a_w = (303,35 \ 1/T) - 2,13$	0,995
Carbonato de Potasio	(K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	$\ln a_w = (145,00 \ 1/T) - 1,30$	0,967
Nitrato de Magnesio	(Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	$\ln a_w = (356,60 \ 1/T) - 1,82$	0,987
Nitrato de Sodio	(NaNO <sub>2</sub> )	$\ln a_w = (435,96 \ 1/T) - 1,88$	0,974
Cloruro de Sodio	(NaCl)	$\ln a_w = (228,92 \ 1/T) - 1,04$	0,961
Cloruro de Potasio	(KCl)	$\ln a_w = (367,58 \ 1/T) - 1,39$	0,967

**Fuente:** Labuza, Kaanane, & Chen (1985).

Tabla 3. Humedades relativas en función de las temperaturas de estudio.

Sales	Formula	Humedad relativa (%)		
		35°C	45°C	55°C
Cloruro de Litio	(LiCl)	11,42	10,81	10,54
Acetato de Potasio	(CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> K)	23,67	21,55	20,61
Cloruro de Magnesio	(MgCl <sub>2</sub> )	32,87	31,80	31,31
Carbonato de Potasio	(K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	44,32	43,63	43,30
Nitrato de Magnesio	(Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	53,58	51,54	50,60
Nitrato de Sodio	(NaNO <sub>2</sub> )	65,85	62,80	61,40
Cloruro de Sodio	(NaCl)	76,17	74,30	73,42
Cloruro de Potasio	(KCl)	85,46	82,11	80,56

**Fuente:** Elaboración Propia (2023).

Se prepararon 09 frascos de vidrio con tapa hermética, en cada uno de ellos, se colocó interiormente un soporte de plástico para los pesa filtros que necesarios las muestras de Sacha culantro. Los recipientes herméticos y los soportes de plástico fueron previamente tratados con una disolución de formol al 40%, para minimizar la contaminación, proliferación bacteriológica y micótica en las muestras, los pesa filtros fueron lavados y esterilizados a 160°C por espacio de 3 horas.

Las disoluciones salinas concentradas se prepararon de acuerdo a las cantidades de sal (g) y agua (ml.) descritas en la Tabla 4.

Tabla 4. Cantidad de sal y agua recomendadas para la preparación de soluciones salinas saturadas.

Sales	Formula	Cantidad de preparación	
		Sal (g)	Agua (ml)
Cloruro de Litio	(LiCl)	150	85
Acetato de Potasio	(CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> K)	200	65
Cloruro de Magnesio	(MgCl <sub>2</sub> )	200	25
Carbonato de Potasio	(K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	200	90
Nitrato de Magnesio	(Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	200	50
Nitrato de Sodio	(NaNO <sub>2</sub> )	200	30
Cloruro de Sodio	(NaCl)	200	60
Cloruro de Potasio	(KCl)	200	80

**Fuente:** Wolf, Spiess, & Jung (1985).

Posteriormente, en cada recipiente hermético de vidrio se colocó un tipo de disolución salina concentrada, con tres gotas de formol, para luego introducir los soportes de plástico. Se pesaron por triplicado en la pesa filtros muestras de 1 g de hojas frescas de sachá culantro para las isotermas de desorción y 0,5 g de muestras secas de hojas de sachá culantro para las isotermas de adsorción. Posteriormente los pesa filtros fueron introducidos en los frascos herméticos de vidrio, los cuales se cerraron y se colocaron en una incubadora a las temperaturas de estudio.

Las muestras se pesaron cuidadosamente cada 48 horas en una “*balanza analítica*”, hasta llegar a un peso constante, instante en el cual, alcanzaron el contenido de humedad de equilibrio con su ambiente; se consideró que la diferencia entre dos pesadas consecutivas sea igual o inferior a 0.001 g (Gabas et al., 2009).

#### 3.3.3.4. Determinación del contenido de humedad de equilibrio ( $X_e$ )

La “*humedad de equilibrio*” se determinó por la diferencia entre la masa de la muestra en equilibrio y su masa seca, tal como se observa en la ecuación 13 (Gabas et al., 2009).

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (13)$$

Donde:

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

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

$m_s$  = Masa de la muestra seca (g).

Para obtener la “*masa seca*” se colocaron las muestras en estufa a 105°C hasta peso constante (AOAC, 1990). La humedad de equilibrio se calculó utilizando la Ecuación 13.

### 3.3.3.5. Determinación del contenido de humedad de la monocapa ( $X_m$ )

La “*humedad de la monocapa*” ( $X_m$ ), fue obtenida a partir del modelo de GAB, una vez realizado el ajuste de los datos experimentales de isothermas. La determinación fue realizada usando regresión no lineal con el software estadístico STATISTICA para Windows versión 5.0.

### 3.3.3.6. Determinación de las propiedades termodinámicas (entalpía diferencial, entropía diferencial, teoría de compensación entalpía-entropía)

- **Entalpía y entropía diferencial**

La entropía diferencial  $\Delta H_d$  fue determinada a partir de los datos ajustados del modelo que mejor describa los datos experimentales de las isothermas. La  $\Delta H_d$  se determinó en función del  $X_e$ . La  $\Delta H_d$  fue calculada a través de la ecuación de Clausius-Clapeyron (ecuación 11).

$$\Delta H_d = -R \left[ \frac{d(\ln a_w)}{d(1/T)} \right]_x$$

Después de la integración, se aplicó la siguiente ecuación que relaciona la entalpía y entropía diferencial de sorción con el  $X_e$  constante (Fasina, 2006).

$$(\ln a_w)_x = -\frac{\Delta H_d}{RT} + \frac{\Delta S_d}{R} \quad (14)$$

Donde:

$\Delta H_d$  = es la entalpía diferencial (kJ/mol).

$\Delta S_d$  = es la entropía diferencial (kJ/mol K).

R = Constante universal de los gases (kJ/mol K).

T = temperatura absoluta (K).

La entalpía y entropía diferencial de sorción fueron obtenidas usando un análisis de regresión lineal (Al-Muhtaseb et al., 2004). Posteriormente los datos de la  $\Delta H_d$  y  $\Delta S_d$  se ajustaron a través de una ecuación exponencial (ecuación 12) a los diferentes  $X_e$  (TSAMI et al., 1990). El ajuste fue realizado con ayuda del software estadístico STATISTICA para Windows versión 5.0.

#### ▪ Teoría de compensación entalpía-entropía

La teoría de compensación entalpía-entropía propone una relación entre la  $\Delta H_d$  y  $\Delta S_d$  (McMinn et al., 2005):

$$\Delta H_d = T_\beta \Delta S_d + \Delta G \quad (15)$$

Donde:

$T_\beta$  = es la temperatura isocinética (K).

$\Delta G$  = es la energía libre de Gibbs (kJ/mol).

La  $T_\beta$  representa la temperatura a la que todas las reacciones procedieron a la misma velocidad. En el presente estudio se aplicó una prueba para validar la teoría de compensación entalpía-entropía en la cual se compararon la temperatura armónica  $T_h$  con la  $T_\beta$  (Krug et al., 1976) definida por:

$$T_h = \frac{n}{\sum_1^n (1/T)} \quad (16)$$

Donde:

n = es el número de isotermas empleado.

### 3.4. Tratamiento de datos

#### 3.4.1. Técnica de análisis de datos

Los puntos experimentales de isotermas de adsorción obtenidos en el presente trabajo fueron ajustados por medio de las ecuaciones de GAB, BET, Halsey, Oswin, Henderson y Chung Pfost.

Asimismo, para determinar las constantes de los modelos matemáticos se utilizó el análisis de “*regresión no lineal*” estimado por el método Quasi-Newton, con un número máximo de 500 interacciones y un criterio de convergencia de 0.0001 con ayuda del programa STATISTICA para Windows versión 5.0. Los ajustes se realizaron a un “*nivel de significancia*” del 5%. Se utilizó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para evaluar la calidad del ajuste de los modelos matemáticos; este parámetro es uno de los primeros criterios para seleccionar la ecuación que describe mejor los datos experimentales; así también, se utilizó el “*desvío porcentual medio*” (P) (ecuación 17) y el error estándar estimado de los valores de humedad (SEE) (ecuación 18), ambos son factores estadísticos ampliamente usados en isotermas para alimentos (Carvalho Lago & Noreña, 2015).

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \quad (17)$$

Donde:

- $X_{ei}$  = Contenido de humedad de equilibrio experimental (gr agua/gr m.s.).
- $X_{ci}$  = Contenido de humedad de equilibrio calculada a partir de cada modelo (gr agua/gr m.s.).
- $n$  = Numero de observaciones.

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Me_{i,exp} - Me_{i,pre})^2}{N - n}} \quad (18)$$

Donde:

- $Me_{i,exp}$  = Contenido de humedad de equilibrio experimental observado.

- $Me_{i,pre}$  = Contenido de humedad de equilibrio  
predeterminada en las observaciones.
- N = Número de observaciones experimentales.
- N = Número de constantes en el modelo.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 4.1. Resultados del análisis fisicoquímico de hojas de sachá culantro

Los resultados del análisis fisicoquímico de las hojas de sachá culantro se presentan en la Tabla 5, obtenidos mediante el promedio aritmético de tres repeticiones.

Tabla 5. Análisis Fisicoquímico de las hojas de sachá culantro

Parámetro evaluado	Valor obtenido (hojas frescas)	Valor obtenido (hojas secas)
Humedad (g/100g de muestra)	87,97	9,90
Grasa (g/100g de muestra)	0,53	3,10
Cenizas (g/100g de muestra)	1,80	10,85
Fibra Cruda (g/100g de muestra)	1,73	10,90
% kcal de glúcidos	60,50	68,65
% kcal de lípidos	11,00	8,40
% kcal de proteínas	28,50	22,95
Energía total (kcal/100g de muestra)	43,60	332,50
Carbohidratos (g/100g de muestra)	6,60	57,10
Proteínas (g/100g de muestra, factor 6,25)	3,10	19,05

Fuente: Laboratorio de análisis químico de la Universidad Agraria de la Molina

### 4.2. Datos experimentales de las isotermas de desorción y adsorción a diferentes temperaturas para las hojas de Sachá culantro.

#### 4.2.1. Modelado de las isotermas de adsorción

En la Tabla 6 presentamos los resultados encontrados para los modelos propuestos, incluyendo sus respectivas constantes y los valores de  $r^2$  y %E. Analizando los coeficientes de correlación obtenidos en cada modelo, se observa en general un buen ajuste de las cifras experimentales, puesto que los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) fueron superiores a 0,92 en la mayoría de los casos, exceptuando los modelos Caurie y Henderson a 55°C que mostraron valores menores a 0,92. Por otra parte, se obtuvieron %E superiores a 10% para todos los modelos a excepción de GAB y Peleg en las cuatro temperaturas trabajadas. Estos datos nos llevan a estimar que

estos dos modelos se ajustan correctamente los datos experimentales, lo cual es consistente con investigaciones precedentes.

Según Quirijns et al., (2005), la base teórica para la isoterma de sorción GAB es el supuesto de adsorción física ubicada en multicapas: la primera capa de agua cubre de manera uniforme la superficie del sorbente y está muy estrechamente unida en una monocapa y las capas posteriores de agua tienen menos interacción con la superficie absorbente, por lo cual este modelo representa un nuevo enfoque mecánico estadístico para estudiar los fenómenos de adsorción multicapa.

Tabla 6. Parámetros estimados y criterios de ajuste de los modelos para las isotermas de adsorción de Sacha culantro.

Modelo	Parámetros	Temperatura (C°)			
		25	35	45	55
GAB	X <sub>m</sub>	0,0651	0,0650	0,0623	0,0469
	C	190492485,55	1125128549,38	103,84	149568539,40
	K	0,9495	0,9526	0,942	0,984
	r <sup>2</sup>	0,9909	0,9932	0,9956	0,9933
	E (%)	6,476	5,941	5,170	3,747
BET	X <sub>m</sub>	0,0477	0,0507	0,0470	0,0433
	C	9,74E+07	4,25E+07	8,01E+07	9,79E+07
	r <sup>2</sup>	0,9581	0,9670	0,9597	0,9899
	E (%)	19,978	16,359	15,030	8,444
Halsey	A	0,0304	0,0318	0,0271	0,0306
	B	1,5292	1,5064	1,5252	1,3319
	r <sup>2</sup>	0,9871	0,9879	0,9942	0,98,22
	E (%)	9,242	9,043	7,290	13,456
Peleg	K <sub>1</sub>	0,6211	0,1458	0,1143	0,6318
	n <sub>1</sub>	6,3458	0,3080	0,2667	7,2161
	K <sub>2</sub>	0,1325	0,6468	0,4694	0,1033
	n <sub>2</sub>	0,2355	6,9520	4,9274	0,2573
	r <sup>2</sup>	0,9870	0,9905	0,9938	0,9918
	E (%)	6,696	8,690	6,185	6,148
Oswin	A	0,1311	0,1324	0,1225	0,0975
	B	0,549	0,546	0,535	0,618
	r <sup>2</sup>	0,9745	0,9736	0,9852	0,9475
	E (%)	14,317	12,770	11,110	19,321
Henderson	A	5,40514	5,84959	6,79984	6,09530
	B	0,9995	1,0587	1,0941	0,9282

	$r^2$	0,9364	0,9357	0,9573	0,8896
	E (%)	22,286	20,32	17,331	25,831
Caurie	V	21,42107	17,29883	16,17851	24,26325
	$X_s$	0,0613	0,0640	0,0631	0,0561
	$r^2$	0,9364	0,9432	0,9696	0,9039
	E (%)	21,113	17,54	12,973	22,334

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.2. Isotermas de adsorción de Sacha culantro según cada modelo de ajuste

La relación entre “*la actividad de agua*” y el “*contenido de humedad*” de un producto a diferentes temperaturas usuales en procesos de elaboración, transporte y vida en anaquel, es denominada isoterma de adsorción de humedad. (Gil et al., 2013).

En esta parte de los resultados presentamos los gráficos que representan a los valores experimentales de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) en relación a la actividad de agua ( $a_w$ ), para las cuatro temperaturas de estudio (25°C, 35°C, 45°C y 55°C) utilizando las ecuaciones matemáticas de GAB, BET, Halsey, Peleg, Oswin, Henderson y Curie modelos ampliamente utilizados en investigaciones de secado de alimentos.

Asimismo, observamos que las “*isotermas*” obtenidas presentan un comportamiento del tipo II, según la clasificación de las isotermas de Van der Waals. Este tipo de isotermas son comunes en materiales de estructura fibrosa, en cuanto a alimentos, este tipo de isoterma es común en cereales, harinas, legumbres, granos secos, frutas, hortalizas deshidratadas y productos en polvo. De esta manera, los resultados obtenidos son similares a los encontrados en los estudios de Červenka et al., (2015) quien trabajó con hierba mate verde y tostada, Bensebia & Allia, (2016) quienes experimentaron con hojas de romero y con el estudio de Pergher et al., (2016) en el que se trabajó con hojas de una planta medicinal denominada *Congrosa*. Por otra parte, en el presente estudio el modelo matemático GAB fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales obtenidos, esta tendencia es similar a la presentada en los estudios de Bensebia & Allia, (2016) y Červenka et al., (2015),

En la Figura 8 mostramos los datos experimentales ajustados al modelo GAB, considerado un planteamiento valioso porque puede ser aplicado en un amplio rango de humedades específicamente ideal para muestras vegetales.

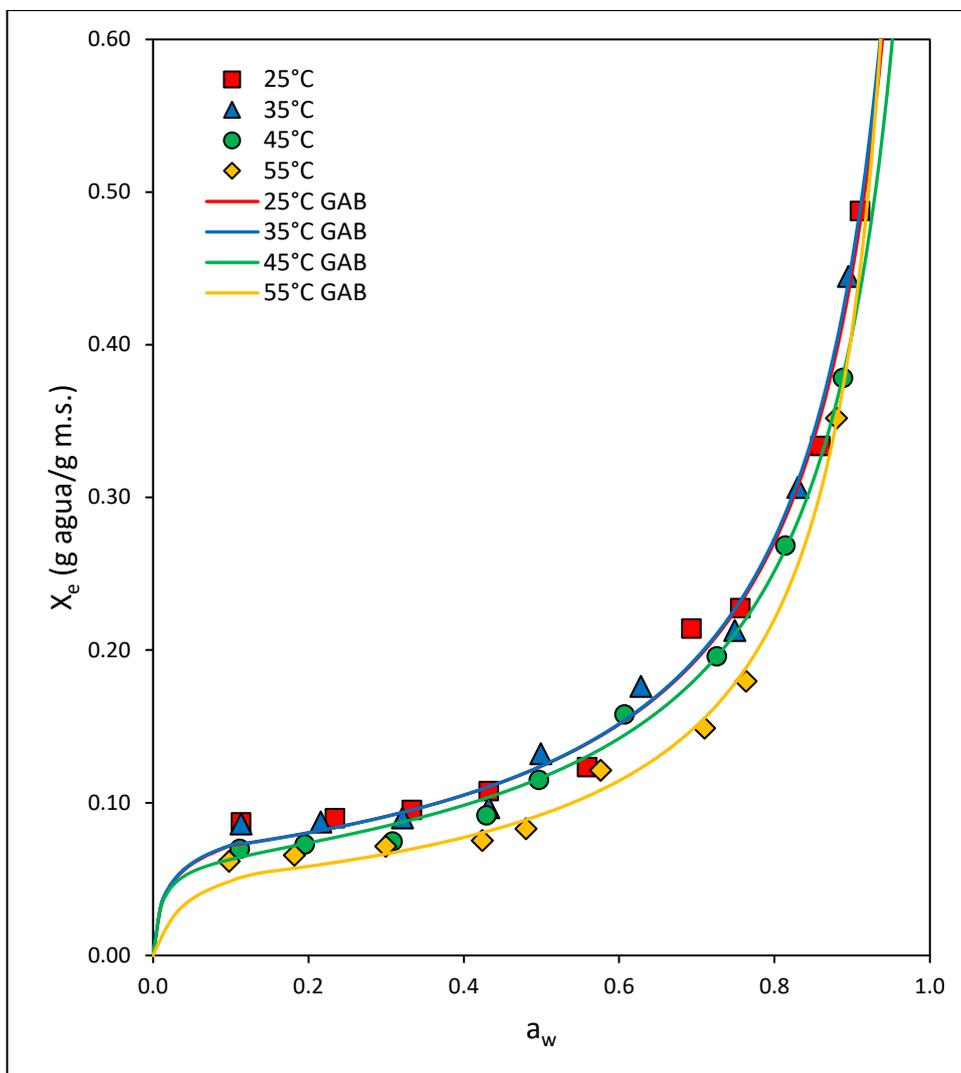


Figura 8. Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo GAB.

En la Figura 8 observamos que la humedad exhibió un “*comportamiento lineal*” hasta un valor de “*actividad de agua*” ( $a_w$ ) de 0,48 a una temperatura de 55°C, a partir de este nivel de humedad, el comportamiento denota una tendencia exponencial. Asimismo, al realizar la misma evaluación a 45 y 35°C, se puede observar un “*comportamiento lineal*” hasta un valor de actividad de agua ( $a_w$ ) de 0,43, a partir de este nivel de humedad, el comportamiento adquiere una tendencia exponencial. Finalmente, al evaluar las isotermas a 25°C, observamos un comportamiento lineal

hasta un valor de actividad de agua ( $a_w$ ) de 0,56 lo que constituye un valor lejano a los otros tres registrados, a partir de este dato, el comportamiento presenta una tendencia exponencial.

Estos resultados sugieren que entre 0,43 y 0,56 de  $a_w$ , si se presentara un leve incremento en la humedad del ambiente tendría una incidencia considerable en el incremento en la humedad de equilibrio del sachá culantro; tal situación puede comprometer la calidad del material durante su almacenamiento. Estos resultados son cercanos a los observados en el estudio de García et al.,(2007) realizado en otras hortalizas de tipo aromático tales como el orégano y el perejil y a los resultados presentados por Fernández et al., (2021) en hojas secas de Justicia pectoralis Jacq. (tilo), en ambos casos materiales similares al estudiado en la presente investigación.

Asimismo, presentamos las “*isotermas de adsorción*” según el modelo BET en la Figura 9.

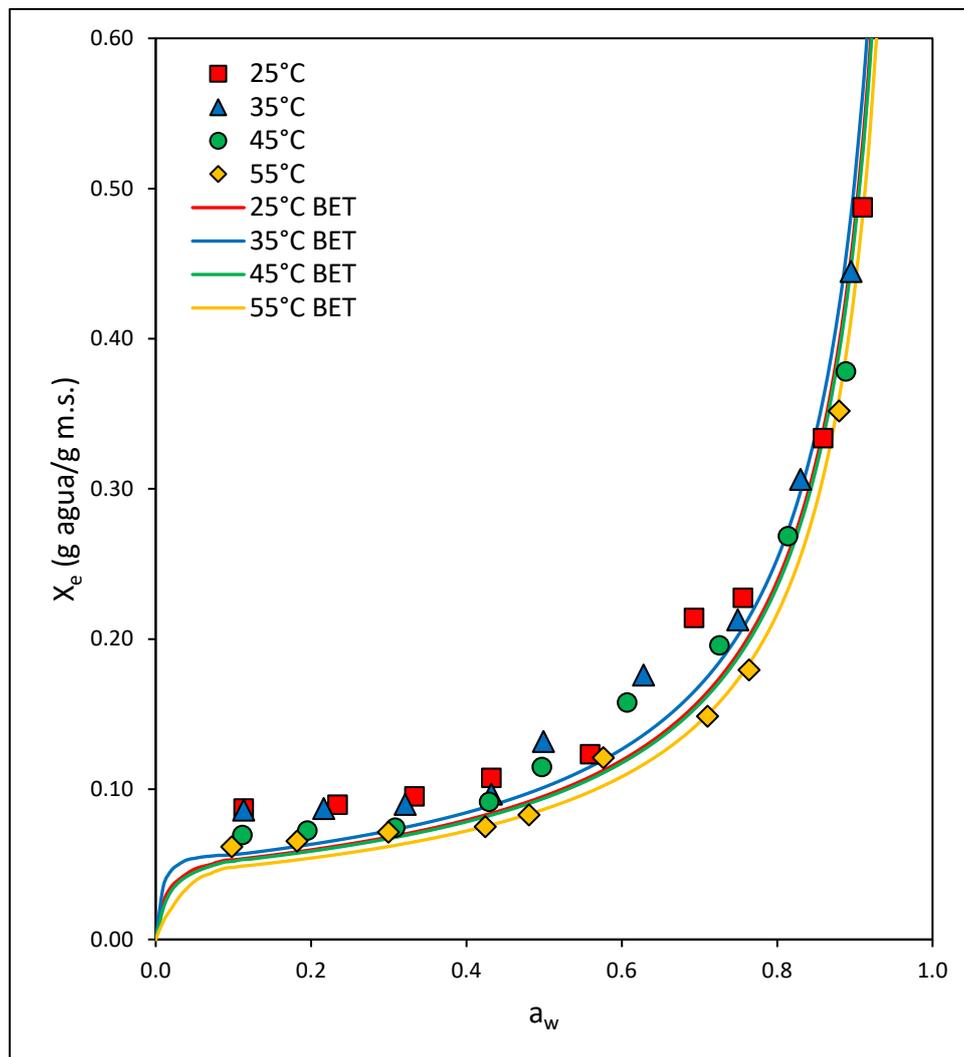


Figura 9. Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo BET

En la Figura 9 observamos que la humedad exhibió un “*comportamiento lineal*” hasta un valor de “*actividad de agua*” ( $a_w$ ) de 0,48 a una temperatura de 55°C, a partir de este nivel de humedad en este parámetro de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. Asimismo, al realizar la evaluación a 45 y 35°C, se encuentra un comportamiento lineal hasta un valor de actividad de agua ( $a_w$ ) de 0,43 a partir de este nivel de humedad bajo estos parámetros de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. De manera similar, los resultados a una temperatura de 25°C exhiben

un “*comportamiento lineal*” hasta 0,56 de actividad de agua ( $a_w$ ), a partir de esta cifra se encuentra una tendencia exponencial de crecimiento.

Estos resultados sugieren que entre 0,43 y 0,56 de  $a_w$ , si se presentara un leve aumento en la “*humedad del ambiente*” tendría una incidencia considerable en el incremento en la humedad de equilibrio del sachá culantro; tal situación puede comprometer la calidad del material durante su almacenamiento. Al igual que en el modelo anterior, estos resultados son cercanos a los observados en el estudio de García et al.,(2007) realizado en otras hortalizas de tipo aromático tales como el orégano y el perejil y a los resultados presentados por Fernández et al., (2021) en hojas secas de Justicia pectoralis Jacq. (tilo), en ambos casos materiales similares al estudiado en la presente investigación.

Asimismo, presentamos las “isotermas de adsorción” según el modelo Halsey en la Figura 10.

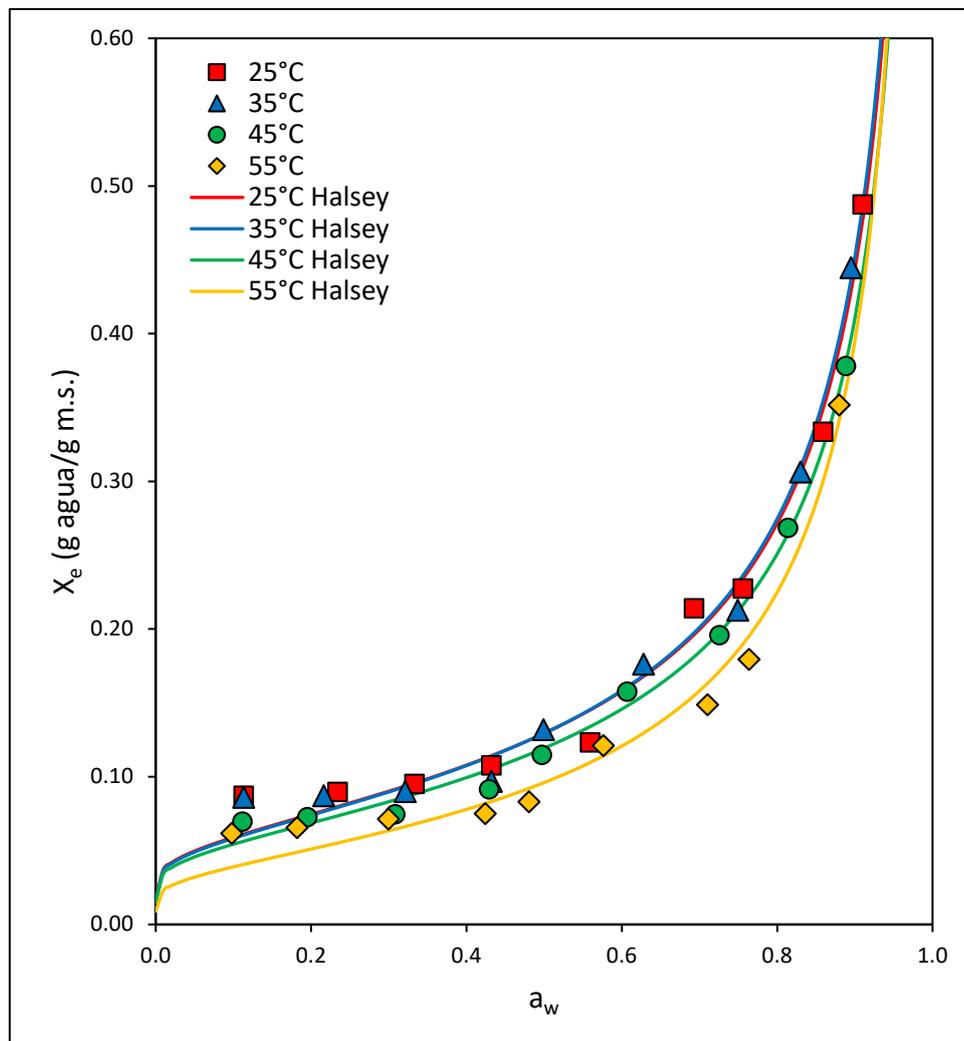


Figura 10 Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo Halsey

En la Figura 10 observamos que la humedad exhibió un comportamiento lineal hasta un valor de “*actividad de agua*” ( $a_w$ ) de 0,48 a una temperatura de 55°C, a partir de este nivel de humedad en este parámetro de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. Asimismo, al realizar la evaluación a 45 y 35°C, se encuentra un comportamiento lineal hasta un valor de actividad de agua ( $a_w$ ) de 0,43 a partir de este nivel de humedad bajo estos parámetros de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. De manera similar, los resultados a una temperatura de 25°C exhiben

un “*comportamiento lineal*” hasta 0,56 de actividad de agua ( $a_w$ ), a partir de esta cifra se encuentra una tendencia exponencial de crecimiento.

Estos resultados sugieren que entre 0,43 y 0,56 de  $a_w$ , si se presentara un leve aumento en la humedad del ambiente tendría una incidencia considerable en el incremento en la humedad de equilibrio del sachá culantro; tal situación puede comprometer la calidad del material durante su almacenamiento. Al igual que en los modelos anteriores, estos resultados son cercanos a los observados en el estudio de García et al.,(2007) realizado en otras hortalizas de tipo aromático tales como el orégano y el perejil y a los resultados presentados por Fernández et al., (2021) en hojas secas de Justicia pectoralis Jacq. (tilo), en ambos casos materiales similares al estudiado en la presente investigación.

Asimismo, presentamos las “*isotermas de adsorción*” según el modelo Peleg en la Figura 11.

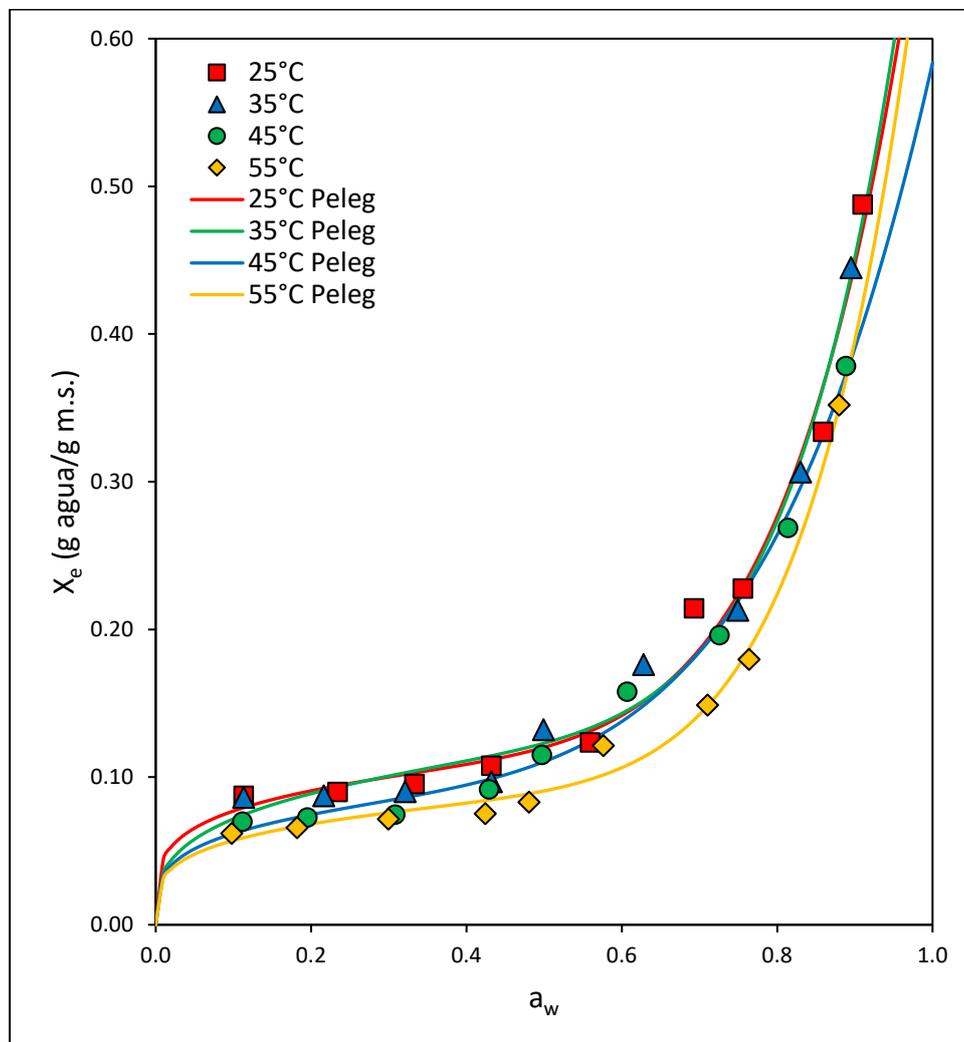


Figura 11. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo Peleg

En la Figura 11 observamos que la humedad exhibió un “*comportamiento lineal*” hasta un valor de “*actividad de agua*” ( $a_w$ ) de 0,48 a una temperatura de 55°C, a partir de este nivel de humedad en este parámetro de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. Asimismo, al realizar la evaluación a 45 y 35°C, se encuentra un comportamiento lineal hasta un valor de actividad de agua ( $a_w$ ) de 0,43 a partir de este nivel de humedad bajo estos parámetros de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia

exponencial. De manera similar, los resultados a una temperatura de 25°C exhiben un “*comportamiento lineal*” hasta 0,58 de actividad de agua ( $a_w$ ), a partir de esta cifra se encuentra una tendencia exponencial de crecimiento.

Estos resultados sugieren que entre 0,43 y 0,58 de  $a_w$ , si se presentara un leve aumento en la humedad del ambiente tendría una incidencia considerable en el incremento en la humedad de equilibrio del sachá culantro; tal situación puede comprometer la calidad del material durante su almacenamiento. Al igual que en los modelos anteriores, estos resultados son cercanos a los observados en el estudio de García et al., (2007) realizado en otras hortalizas de tipo aromático tales como el orégano y el perejil y a los resultados presentados por Fernández et al., (2021) en hojas secas de *Justicia pectoralis* Jacq. (tilo), en ambos casos materiales similares al estudiado en la presente investigación.

Asimismo, presentamos las “isotermas de adsorción” según el modelo Oswin en la Figura 12.

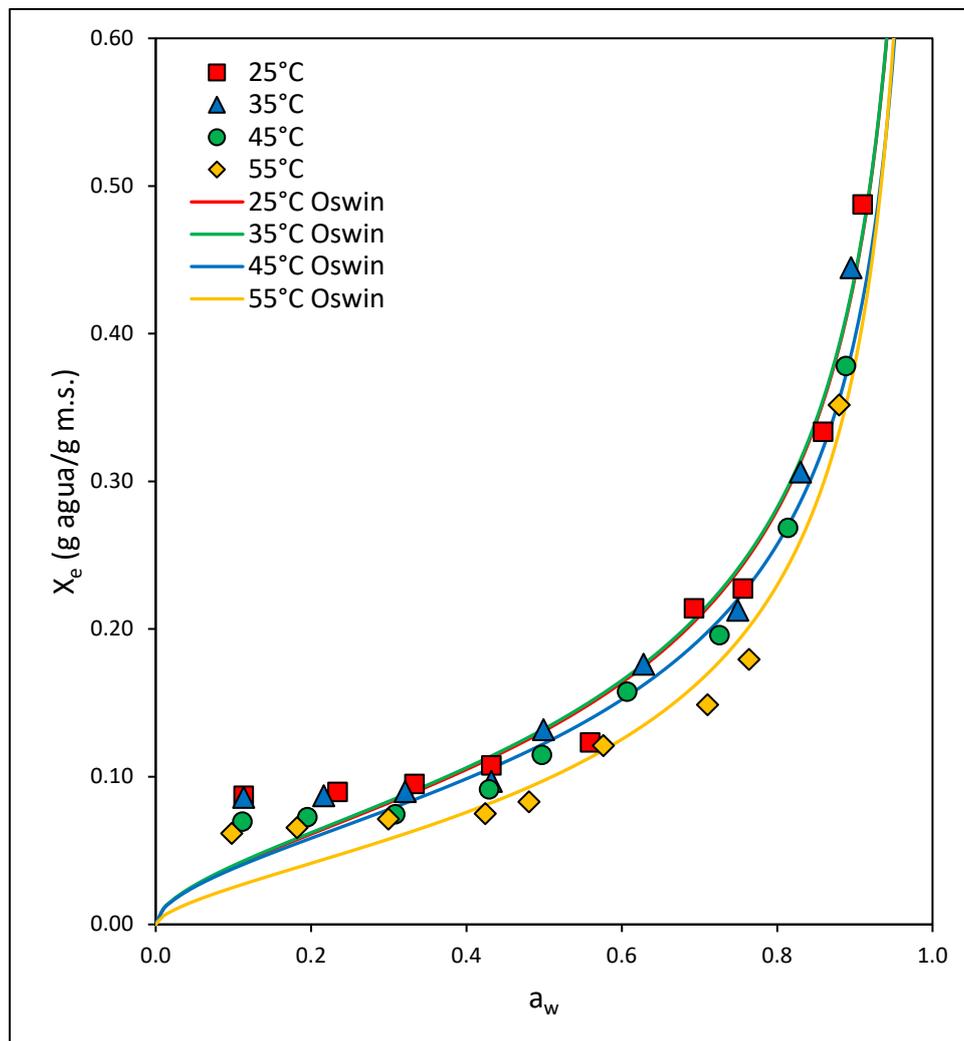


Figura 12 Isotermas de adsorción para el sachaculantro a las temperaturas de estudio según modelo Oswin

En la Figura 12 observamos que la humedad exhibió un “comportamiento lineal” hasta un valor de “actividad de agua” ( $a_w$ ) de 0,48 a una temperatura de 55°C, a partir de este nivel de humedad en este parámetro de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. Asimismo, al realizar la evaluación a 45 y 35°C, se encuentra un comportamiento lineal hasta un valor de “actividad de agua” ( $a_w$ ) de 0,43 a partir de este nivel de humedad bajo estos parámetros de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. De manera similar, los resultados a una temperatura de 25°C exhiben

un “*comportamiento lineal*” hasta 0,56 de actividad de agua ( $a_w$ ), a partir de esta cifra se encuentra una tendencia exponencial de crecimiento.

Estos resultados sugieren que entre 0,43 y 0,56 de  $a_w$ , si se presentara un leve aumento en la humedad del ambiente tendría una incidencia negativa considerable en la humedad de equilibrio del sachá culantro; tal situación puede comprometer la calidad del material durante su almacenamiento. Al igual que en los modelos anteriores, estos resultados son cercanos a los observados en el estudio de García et al.,(2007) realizado en otras hortalizas de tipo aromático tales como el orégano y el perejil y a los resultados presentados por Fernández et al., (2021) en hojas secas de *Justicia pectoralis* Jacq. (tilo), en ambos casos materiales similares al estudiado en la presente investigación.

Asimismo, presentamos las “*isotermas de adsorción*” según el modelo Henderson en la Figura 13.

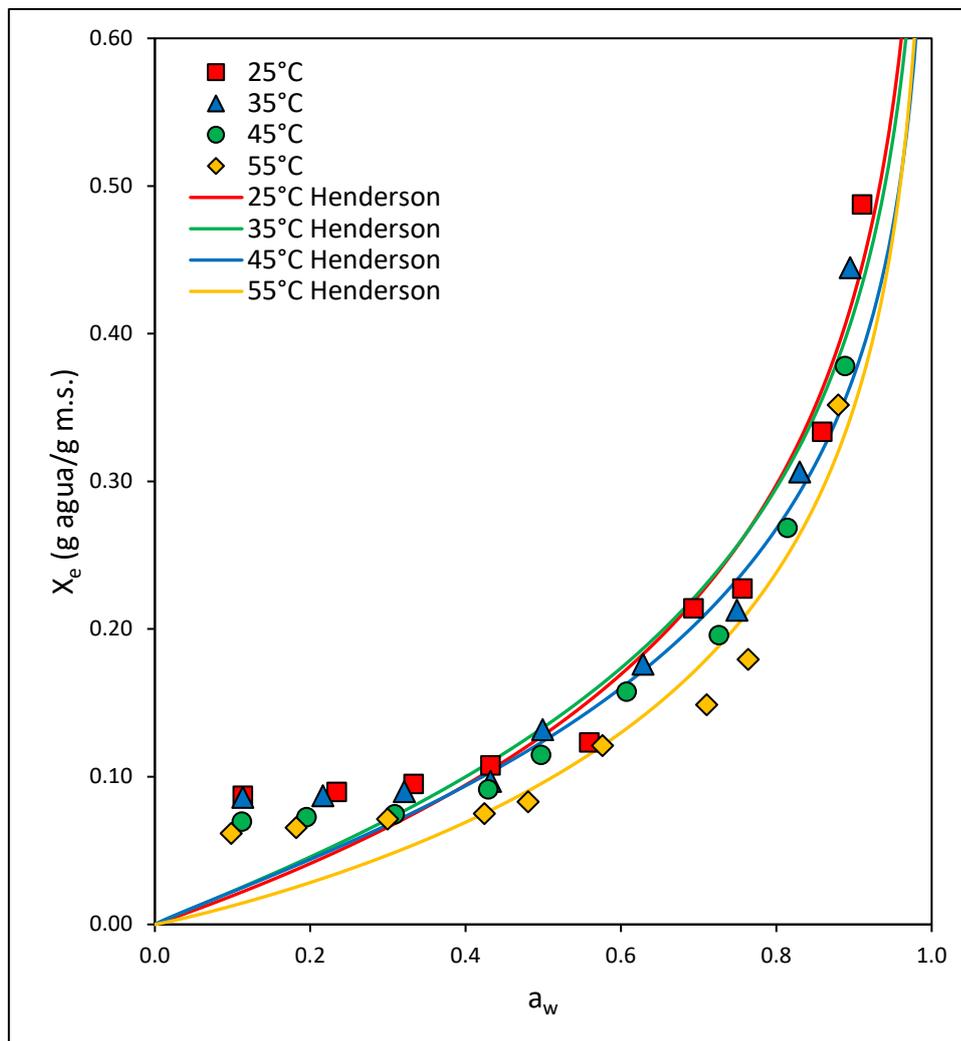


Figura 13 Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las temperaturas de estudio según modelo Henderson

En la Figura 13. observamos que la humedad exhibió un “*comportamiento lineal*” hasta un valor de “*actividad de agua*” ( $a_w$ ) de 0,48 a una temperatura de 55°C, a partir de este nivel de humedad en este parámetro de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. Asimismo, al realizar la evaluación a 45 y 35°C, se encuentra un comportamiento lineal hasta un valor de “*actividad de agua*” ( $a_w$ ) de 0,43 a partir de este nivel de humedad bajo estos parámetros de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. De manera similar, los resultados a una temperatura de 25°C exhiben

un “*comportamiento lineal*” hasta 0,56 de actividad de agua ( $a_w$ ), a partir de esta cifra se encuentra una tendencia exponencial de crecimiento.

Estos resultados sugieren que entre 0,43 y 0,56 de  $a_w$ , si se presentara un leve aumento en la humedad del ambiente tendría una incidencia considerable en el incremento en la humedad de equilibrio del sachá culantro; tal situación puede comprometer la calidad del material durante su almacenamiento. De manera similar que en los modelos anteriores, estos resultados son cercanos a los observados en el estudio de García et al.,(2007) realizado en otras hortalizas de tipo aromático tales como el orégano y el perejil y a los resultados presentados por Fernández et al., (2021) en hojas secas de Justicia pectoralis Jacq. (tilo), en ambos casos materiales similares al estudiado en la presente investigación.

Asimismo, presentamos las “isotermas de adsorción” según el modelo Caurie en la Figura 14.

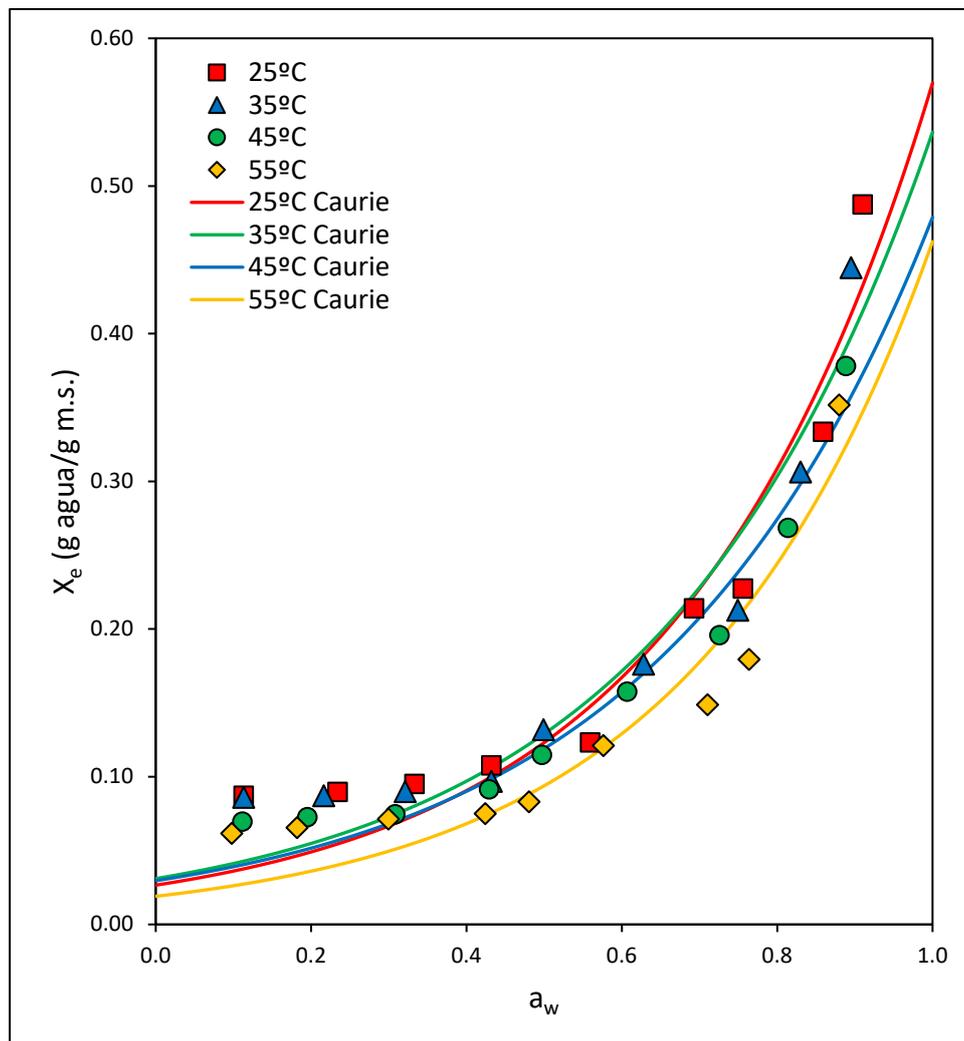


Figura 14. Isotermas de adsorción para el sachaculantro a las temperaturas de estudio según modelo Caurie

En la Figura 14. observamos que la humedad exhibió un “comportamiento lineal” hasta un valor de “actividad de agua” ( $a_w$ ) de 0,48 a una temperatura de 55°C, a partir de este nivel de humedad en este parámetro de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. Asimismo, al realizar la evaluación a 45 y 35°C, se encuentra un “comportamiento lineal” hasta un valor de actividad de agua ( $a_w$ ) de 0,43 a partir de este nivel de humedad bajo estos parámetros de temperatura experimental, el comportamiento denota una tendencia exponencial. De manera similar, los resultados a una temperatura de 25°C exhiben

un “*comportamiento lineal*” hasta 0,56 de actividad de agua ( $a_w$ ), a partir de esta cifra se encuentra una tendencia exponencial de crecimiento.

Estos resultados sugieren que entre 0,43 y 0,56 de  $a_w$ , si se presentara un leve incremento en la humedad del ambiente tendría una incidencia negativa considerable en el la humedad de equilibrio del sachá culantro; tal situación puede comprometer la calidad del material durante su almacenamiento. De manera similar que, en los modelos anteriores, estos resultados son cercanos a los observados en el estudio de García et al., (2007) realizado en otras hortalizas de tipo aromático tales como el orégano y el perejil y a los resultados presentados por Fernández et al., (2021) en hojas secas de Justicia pectoralis Jacq. (tilo), en ambos casos materiales similares al estudiado en la presente investigación.

Así también, en la Figura 15. se presentan las “*isotermas*” de Sacha culantro a las cuatro temperaturas evaluadas

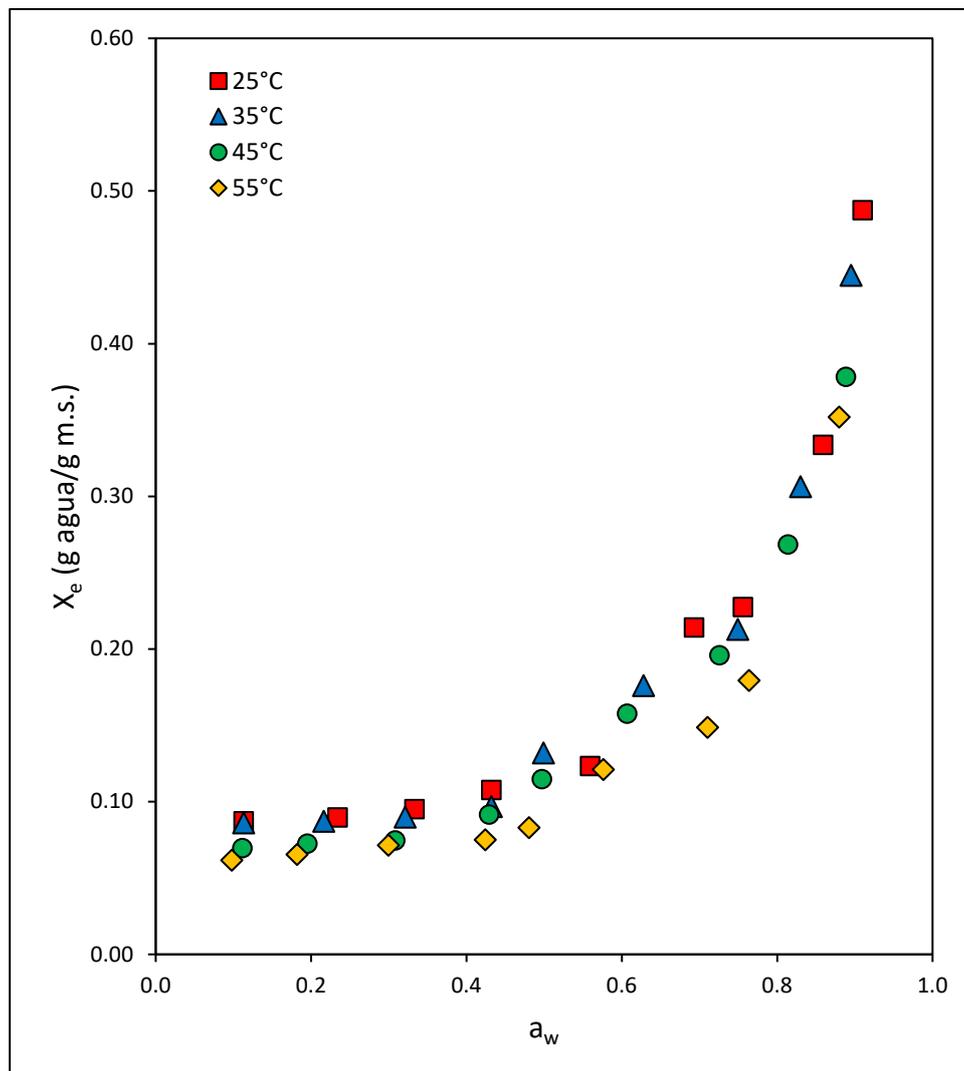


Figura 15. Isotermas de adsorción para el sachá culantro a las cuatro temperaturas de estudio

En la Figura 15. se evidencian curvas de forma sigmoidal comunes en isotermas de absorción, de las cuales se deduce que a bajas actividades del agua ( $a_w$ ), el incremento en la absorción es lento, no obstante, a actividades intermedias y altas, la absorción se incrementa de manera más notoria. Asimismo, podemos observar la superposición de puntos para una  $a_w = 0,43$  a las temperaturas de 25, 35 y 45°C. Por debajo de este valor, el contenido de humedad crece al aumentar la temperatura.

### 4.2.3. Propiedades termodinámicas para la adsorción

#### 4.3.3.1 Entalpía diferencial (Calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ) y entropía diferencial ( $\Delta S$ ))

Según Ramírez-Miranda et al., (2014), los datos de entalpía de sorción son importantes porque proporcionan una idea de la energía necesaria para retirar una determinada proporción de agua de los alimentos. La entalpía diferencial de “adsorción” es una medida termodinámica que describe el cambio en entalpía ( $\Delta H$ ) asociado con la adsorción de una pequeña cantidad adicional de adsorbato en una superficie de adsorbente.

En la Tabla 7. se muestran los valores de calor isostérico de adsorción experimentales calculados mediante la ecuación de Tsami.

Tabla 7. Valores de  $q_{st}$  experimentales y calculados mediante la ec° de Tsami

$X_e$	$q_{st}$ exp.	$q_{st}$ cal.
	kJ/mol	kJ/mol
0,073	50,2257054	46,683896
0,075	41,6082444	42,157894
0,079	34,025045	36,817207
0,088	23,0979548	25,850132
0,110	12,8251764	11,047987
0,152	6,59192118	2,216677
0,186	4,4962112	0,595392
0,252	2,53136358	0,047639
0,392	0,91113126	0,000216

Fuente: Elaboración Propia a partir de la ecuación de Tsami

En la Tabla 7. podemos apreciar que las cifras del calor isostérico experimental son cercanas a los datos del calor isostérico calculado para la mayoría de valores de “*humedad de equilibrio*”, diferenciándose a medida que la humedad de equilibrio se incrementa. Esta congruencia, nos lleva a estimar que el modelo de la ecuación de Tsami es apropiado para describir el comportamiento termodinámico de las muestras analizadas.

En la Figura 16. presentamos los valores del “*calor isostérico de adsorción*” ( $q_{st}$ ) en relación a la “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ ), calculados usando la ecuación de Tsami

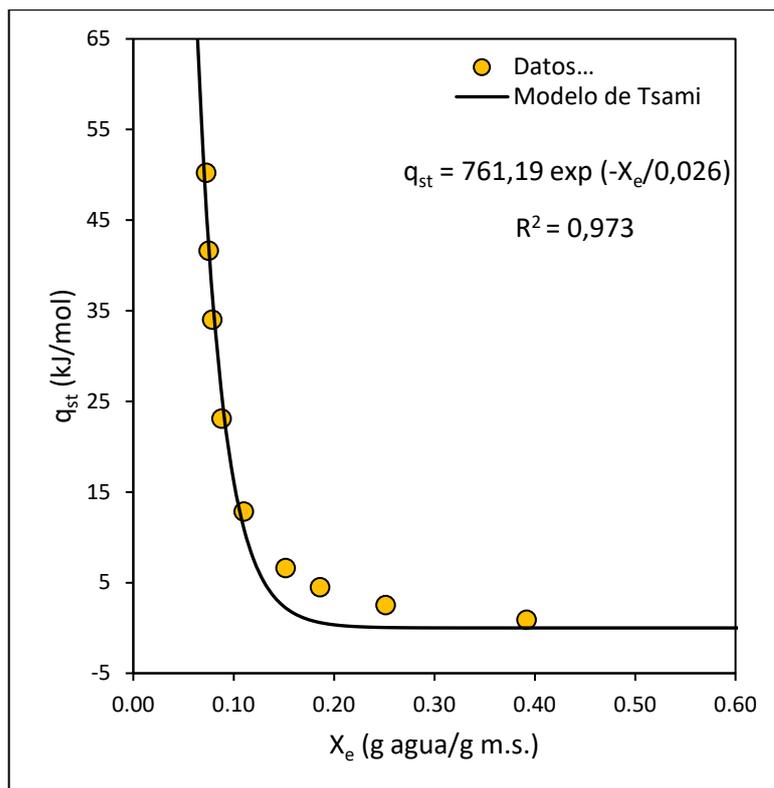


Figura 16. Valores del “*calor isostérico de adsorción*” ( $q_{st}$ ) en relación a la “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ )

En la Figura 16. podemos observar que el “*calor isostérico de adsorción*” ( $q_{st}$ ) disminuye desde 51,477435 a 0,000231 kJ/mol, con el incremento de la  $X_e$  de 0,075 a 0,39 g agua/g m.s. cabe mencionar que las hojas de sacha culantro se caracterizan por su alto contenido de humedad inicial. La tendencia observada en la Figura 16, sugiere que el material estudiado puede presentar sitios con alta energía vinculados directamente con compuestos o grupos funcionales polares. Asimismo, estos resultados significan que a medida que disminuye el  $X_e$  se incrementa la interacción sólido-vapor de agua en los sitios activos de unión en la superficie del material, mientras que al incrementarse la  $X_e$  el calor isostérico disminuye, debido a que el agua ocupa menos sitios activos, esto desencadena una disminución en la interacción de energía entre las moléculas de agua y el material estudiado. Comportamientos similares se observaron en otros estudios de adsorción con otras muestras de alimentos tales como la harina de yuca estudiada por (Aponte, 2011), (Aviara et al., 2002). Asimismo, la tendencia registrada en los resultados son congruentes con investigaciones realizadas en otros productos tales como el té de

menta (Machhour et al., 2012), .cúrcuma (Siqueira-de-Lima et al., 2024) pimienta negra (Yogendrarajah et al., 2015), entre otras investigaciones en alimentos aromáticos

Por otra parte, los parámetros considerados para los cálculos en la ecuación de Tsami, se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. parámetros considerados para los cálculos en la ecuación de Tsami

Parámetros de Tsami	
$q_0 =$	761,191
$X_0 =$	0,02599
$R^2 =$	0,97332

Fuente: Elaboración Propia a partir de la ecuación de Tsami

De la misma forma, considerando que la entropía diferencial como propiedad termodinámica, describe el cambio en la entropía asociado con la adsorción de una pequeña cantidad adicional de adsorbato en una superficie de adsorbente, manteniendo constante la cobertura superficial del adsorbato. presentamos en la Tabla 9 los valores de entropía diferencial.

Tabla 9. Valores de entropía diferencial ( $\Delta S$ ) para la adsorción

$X_e$	$\Delta S$ exp.	$\Delta S$ cal.
	(kJ/mol K)	(kJ/mol K)
0,073	0,14437261	0,134841368
0,075	0,118532698	0,120569737
0,079	0,095968502	0,10392092
0,088	0,063873968	0,070504111
0,110	0,034395018	0,027747163
0,152	0,017052014	0,004763889
0,186	0,011364407	0,001126356
0,252	0,006120767	0,000070538
0,392	0,001875638	0,000000190

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 9. podemos apreciar que las cifras de la entalpía diferencial experimental son cercanas a los datos de la entalpía diferencial calculada para la mayoría de datos de “*humedad de equilibrio*”, diferenciándose en cuanto la humedad de equilibrio se incrementa. Esta congruencia, nos lleva a estimar que el modelo matemático usado

es adecuado para describir el comportamiento termodinámico de las muestras analizadas.

En la Figura 17. presentamos los datos de la entropía diferencial para la adsorción en relación al contenido de “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ ).

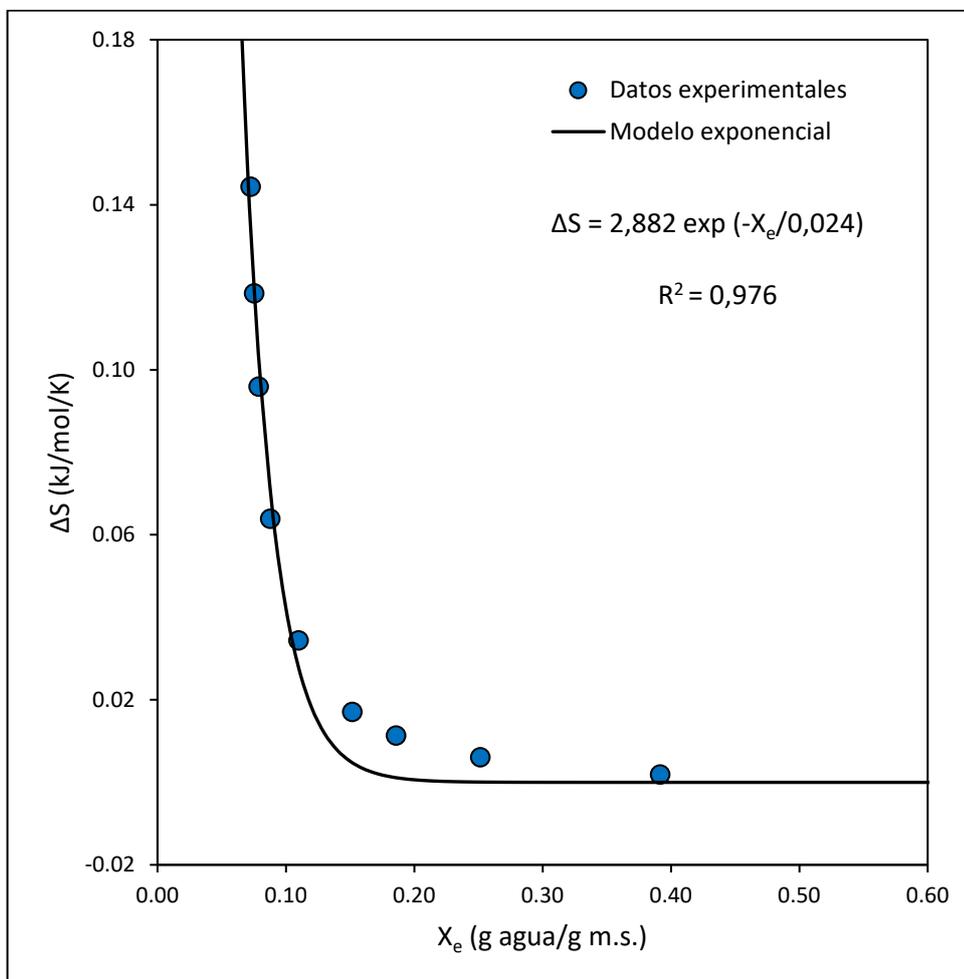


Figura 17. Valores de la entropía diferencial para la adsorción en relación al contenido de “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ )

En la Figura 17. podemos observar que la entropía diferencial decrece desde 0,150104 a 0,000000 kJ/mol, con el incremento de la  $X_e$  de 0,075 a 0,39 g agua/g m.s. En términos generales, el cambio de entropía  $\Delta S$  decrece exponencialmente con el incremento del contenido de agua  $X_e$ .

Estos resultados nos llevan a estimar que a medida que la “*humedad de equilibrio*” aumenta, las moléculas de agua se integran en la estructura de las hojas de manera más ordenada, lo que reduce el desorden en el sistema.

Tendencias similares se observaron en investigaciones con otros productos tales como la pimienta negra (Yogendrarajah et al., 2015), cuya disminución de la entropía diferencial es menos prominente que el presente estudio, esto puede deberse, entre otras cosas a la composición química complicada de la pimienta negra; de la misma forma, una tendencia cercana se presenta en el mucílago de chíá estudiado por Velázquez-Gutiérrez et al., (2015), no obstante, en esta investigación se observó un notorio incremento en la entropía al aumentarse drásticamente la humedad de equilibrio, esto se debe a las características del material estudiado que difieren a las hojas de sachá culantro.

De la misma forma, considerando que la teoría de compensación entalpía-entropía plantea la existencia una interdependencia entre  $\Delta H$  y  $\Delta S$  de tal forma que las variaciones en una de estas magnitudes se compensan en parte por variaciones en la otra y, considerando que esta relación tiene alta implicancia en sistemas biológicos, especialmente en la cinética enzimática, en la Tabla 10 se muestran los datos experimentales de la relación entalpía- entropía.

Tabla 10. Teoría de compensación entalpía- entropía para la adsorción

$\Delta S$ exp. (kJ/mol K)	$q_{st}$ exp. (KJ/mol)
0,1444	50,2257
0,1185	41,6082
0,0960	34,0250
0,0639	23,0980
0,0344	12,8252
0,0171	6,5919
0,0114	4,4962
0,0061	2,5314
0,0019	0,9111

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 10 podemos apreciar que el calor isostérico de adsorción disminuye con la disminución de la entropía y viceversa, Ambos fenómenos (calor isostérico y entropía) tienden a estabilizarse en valores bajos mientras que el contenido de humedad aumenta, lo que es típico en materiales higroscópicos donde las primeras capas de agua son más energéticamente costosas de sorber.

En la Figura 18. presentamos los valores de la relación entre el “calor isostérico” ( $q_{st}$ ) y el cambio de entropía ( $\Delta S$ ) para la adsorción.

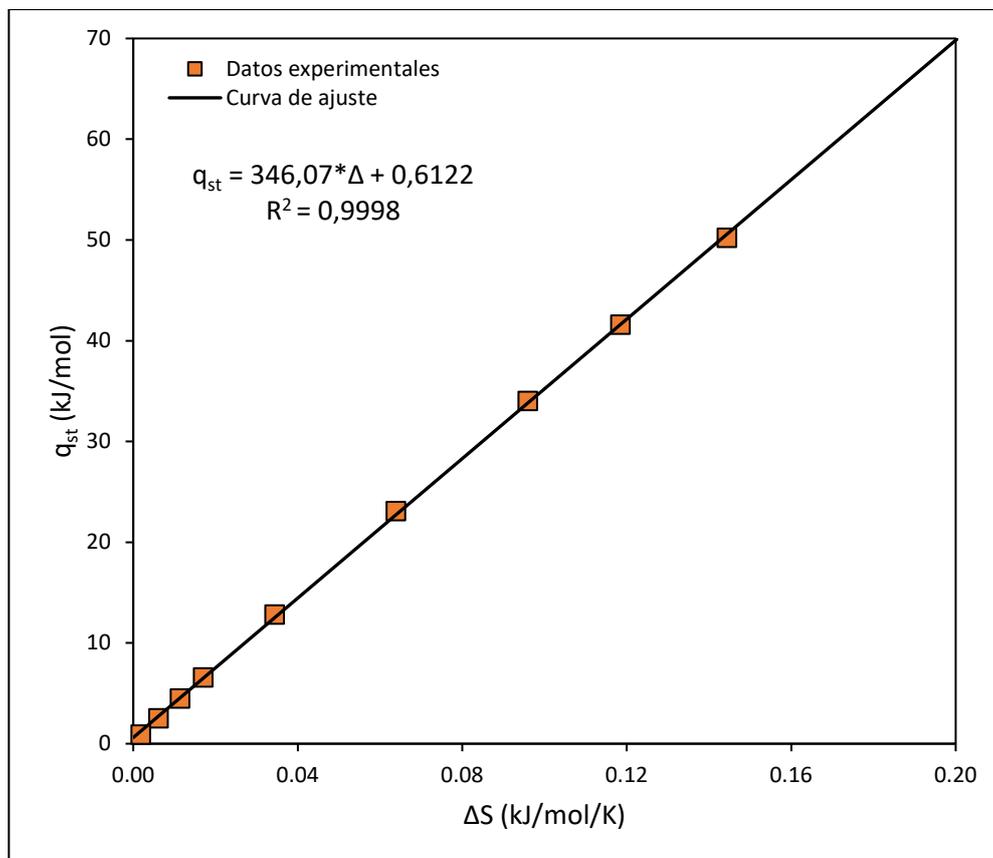


Figura 18. Relación entre el calor isostérico ( $q_{st}$ ) y el cambio de entropía ( $\Delta S$ ) para la adsorción.

En la Figura 18. podemos observar que existe una relación lineal entre el calor isotérico  $q_{st}$  y la variación de la entropía  $\Delta S$ , así, un aumento en  $q_{st}$  está acompañado por un aumento correspondiente en  $\Delta S$ ; asimismo, el valor de  $R^2=0,9998$  indica una excelente correlación con los datos experimentales, lo que significa que casi toda la variabilidad de  $q_{st}$  puede ser explicada por la variabilidad en  $\Delta S$ .

#### 4.2.4. Modelado de las isotermas de desorción

En la Tabla 11. presentamos los resultados encontrados para los modelos propuestos, incluyendo sus respectivas constantes y los valores de  $r^2$  y %E.

Tabla 11. Parámetros estimados y criterios de ajuste de los modelos para las isotermas de desorción de Sacha culantro.

Modelo	Parámetros	Temperatura (C°)		
		35	45	55
GAB	X <sub>m</sub>	0,0556	0,0484	0,0376
	C	58,3440	40,5478	8,7700
	K	1,0051	1,0190	1,0210
	r <sup>2</sup>	0,9964	0,9971	0,9994
	E (%)	5,9405	7,1808	3,7474
BET	X <sub>m</sub>	0,0578	0,0560	0,0445
	C	33,0443	11,0098	3,7815
	r <sup>2</sup>	0,9961	0,9928	0,9969
	E (%)	7,0424	7,1808	3,7474
Halsey	A	0,0558	0,0571	0,0464
	B	1,1353	1,0581	0,9988
	r <sup>2</sup>	0,9935	0,9920	0,9988
	E (%)	12,0077	12,2278	5,4533
Peleg	K <sub>1</sub>	0,1647	1,1981	0,1108
	n <sub>1</sub>	0,5793	10,0324	0,7531
	K <sub>2</sub>	1,1001	0,1580	0,7762
	n <sub>2</sub>	9,1704	0,6511	8,4494
	r <sup>2</sup>	0,9940	0,9966	0,9987
	E (%)	9,4944	8,6400	5,8408
Oswin	A	0,1069	0,0927	0,0656
	B	0,7540	0,8080	0,8518
	r <sup>2</sup>	0,9843	0,9814	0,9930
	E (%)	18,8636	21,0434	16,6722
Henderson	A	3,5379	3,5241	4,0862
	B	0,6956	0,6509	0,6260
	r <sup>2</sup>	0,9611	0,9568	0,9764
	E (%)	29,5593	34,9993	32,1455
Caurie	V	79,1408	105,3431	126,0981
	X <sub>s</sub>	0,0484	0,0454	0,0418
	r <sup>2</sup>	0,9543	0,9499	0,9728
	E (%)	29,4882	34,5857	30,6635

Fuente: Elaboración Propia

Analizando los coeficientes de correlación obtenidos en cada modelo mostrados en la Tabla 11, se observa en general un buen ajuste de las cifras experimentales, puesto que los coeficientes de correlación (R<sup>2</sup>) fueron superiores a 0,92 para todos

los casos. Por otra parte, se obtuvieron %E superiores a 10% para todos los modelos a excepción de GAB, BET y Peleg en las tres temperaturas trabajadas. Estos datos nos llevan a estimar que estos dos modelos se ajustan correctamente los datos experimentales, lo cual es consistente con investigaciones precedentes.

#### **4.2.5. Isotermas de desorción de Sacha culantro según cada modelo de ajuste**

En los resultados que presentamos, el tiempo necesario experimentalmente para alcanzar la “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ ) en las muestras fue de 25, 15 y 10 días para las temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C respectivamente.

Según González Hurtado et al., (2014) el conocimiento de las propiedades de desorción por medio del estudio de las isotermas en alimentos, es importante para evaluar el comportamiento del material estudiado, su estabilidad y cambios, lo cual, nos permitirá seleccionar adecuadamente los materiales de empaque a utilizar. Por otra parte, las “*isotermas de desorción*” experimentales en el presente estudio, denotan la relación entre la cantidad de agua que se libera de las hojas de sachá culantro y la “*actividad de agua*” a una temperatura constante. De esta forma, presentamos las isotermas de desorción según el modelo GAB a las tres temperaturas experimentales en la Figura 19.

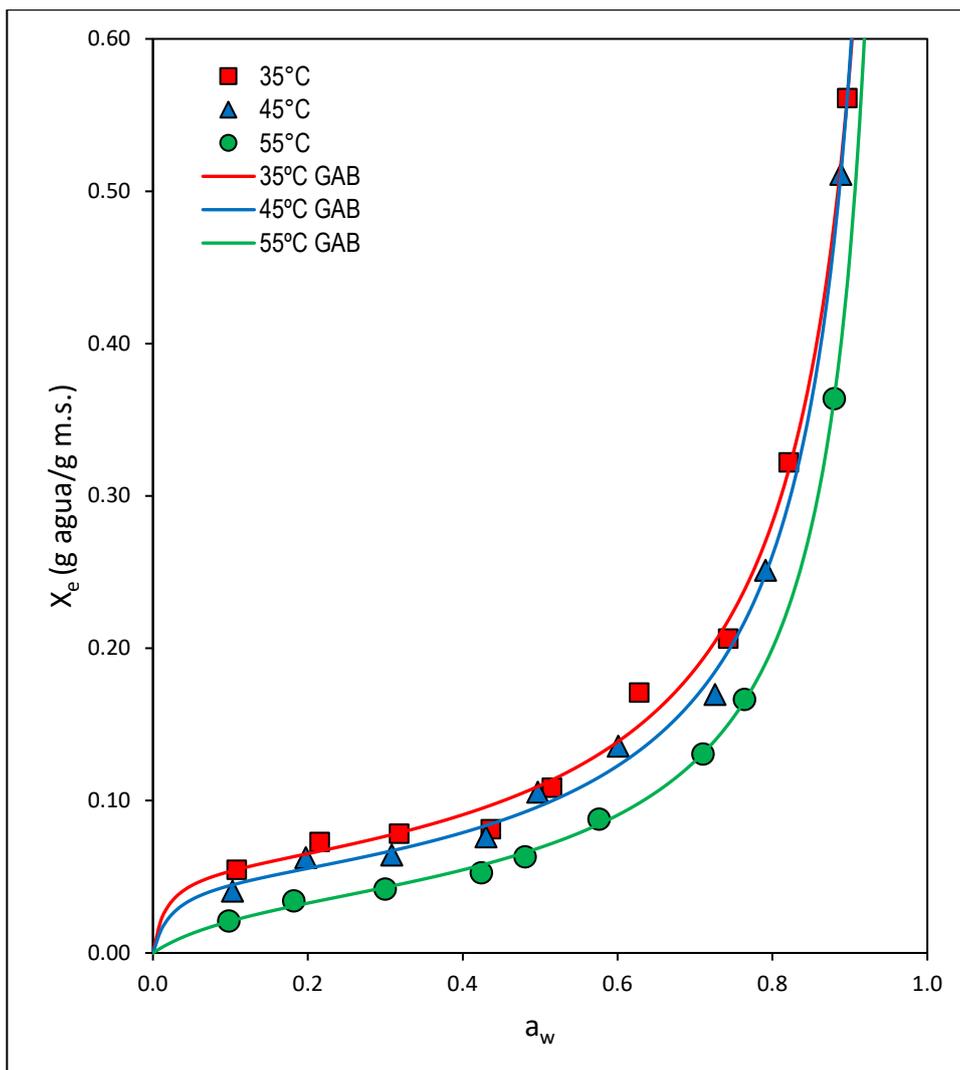


Figura 19. Isotermas de desorción para el sachaculantro a las temperaturas de estudio según modelo GAB

En la Figura 19. observamos que, para la temperatura de 55°C, existe una tendencia lineal hasta el punto 0,49 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial; por otra parte, para las temperaturas experimentales de 45 °C y 35°C, se presenta una tendencia lineal hasta el punto 0,43 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial. En términos generales, podemos observar que, a medida que se incrementa la “*actividad del agua*” ( $a_w$ ), la cantidad de agua desorbida ( $X_e$ ) se va incrementando, lo que indica que más agua se libera de las hojas de sachaculantro a mayor  $a_w$ . Asimismo, notamos que, a una misma actividad del agua, la cantidad de agua desorbida es menor a temperaturas más altas (55°C)

comparándola con temperaturas más bajas de 35 y 45°C, lo cual sugiere que estas serían las temperaturas más adecuadas para su tratamiento. No se encontraron resultados similares en otros estudios en hojas vegetales; sin embargo si se evidencian comportamientos similares en los estudios de Ayala-Aponte et al., (2012) y González Hurtado et al., (2014), realizados en pitajaya amarilla y jamón de cerdo cocido respectivamente.

Asimismo, presentamos las isotermas de desorción según el modelo Bet en la Figura 20.

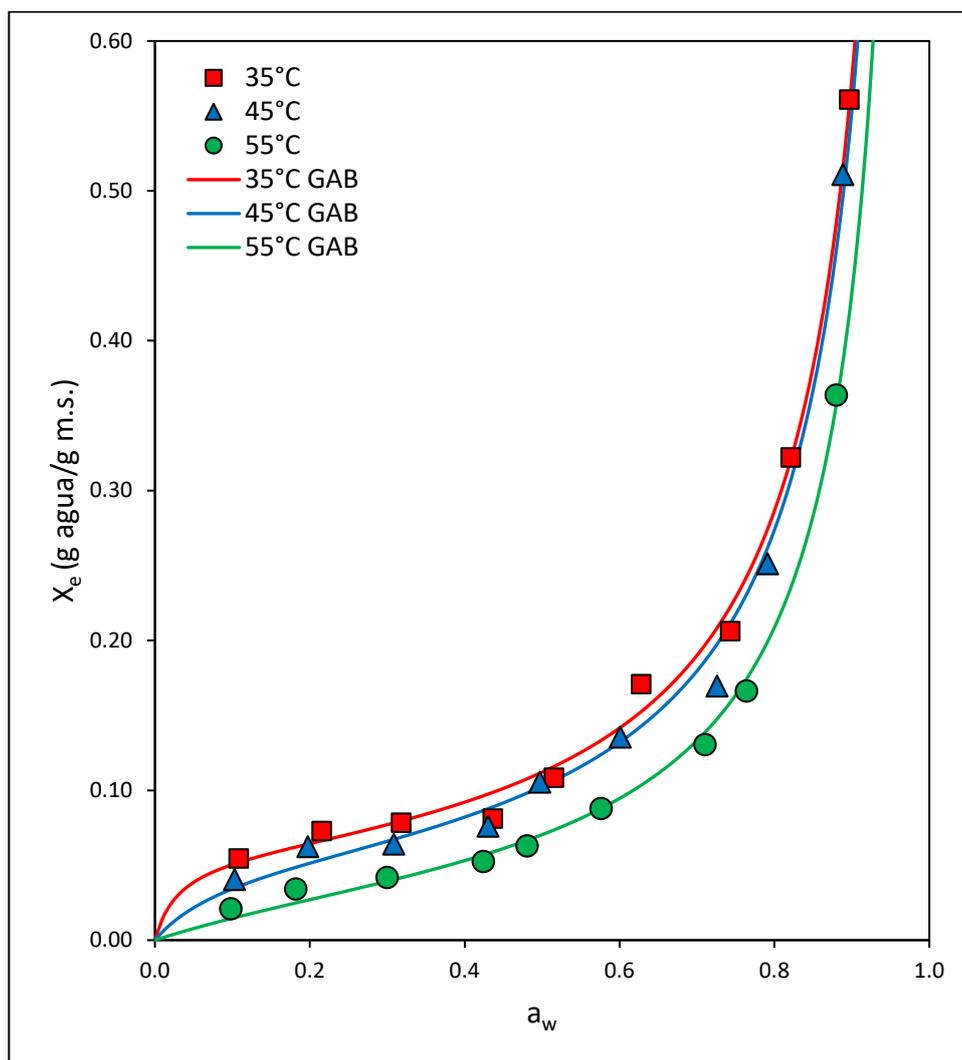


Figura 20. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las cuatro temperaturas de estudio según modelo Bet

En la Figura 20. observamos que, para la temperatura de 55°C, existe una tendencia lineal hasta el punto 0,48 de actividad de agua, a partir de este punto, el

comportamiento denota una tendencia exponencial; por otra parte, para las temperaturas experimentales de 45 °C y 35°C, se presenta una tendencia lineal hasta el punto 0,43 de “*actividad de agua*”, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial. En términos generales, podemos observar que, a medida que se incrementa la actividad del agua ( $a_w$ ), la cantidad de agua desorbida ( $X_e$ ) se va incrementando, lo que indica que más agua se libera de las hojas de sachaculantro a mayor  $a_w$ . Asimismo, notamos que, a una misma actividad del agua, la cantidad de agua desorbida es menor a temperaturas más altas (55°C) comparándola con temperaturas más bajas (35°C). Asimismo, observamos que existe una leve superposición de puntos en las isotermas de 45 y 35°C para los puntos de actividad de agua de 0,43 y 0,5, lo que sugiere que a estas temperaturas y niveles de  $a_w$  se presentan comportamientos similares, esta tendencia no se observa a 55°C. De la misma forma que el modelo anterior, no se encontraron resultados similares en otros estudios en hojas vegetales; sin embargo si se evidencian comportamientos similares en los estudios de Ayala-Aponte et al., (2012) y González Hurtado et al., (2014), realizados en pitajaya amarilla y jamón de cerdo cocido respectivamente.

Asimismo, presentamos las isotermas de desorción según el modelo Halsey en la Figura 21.

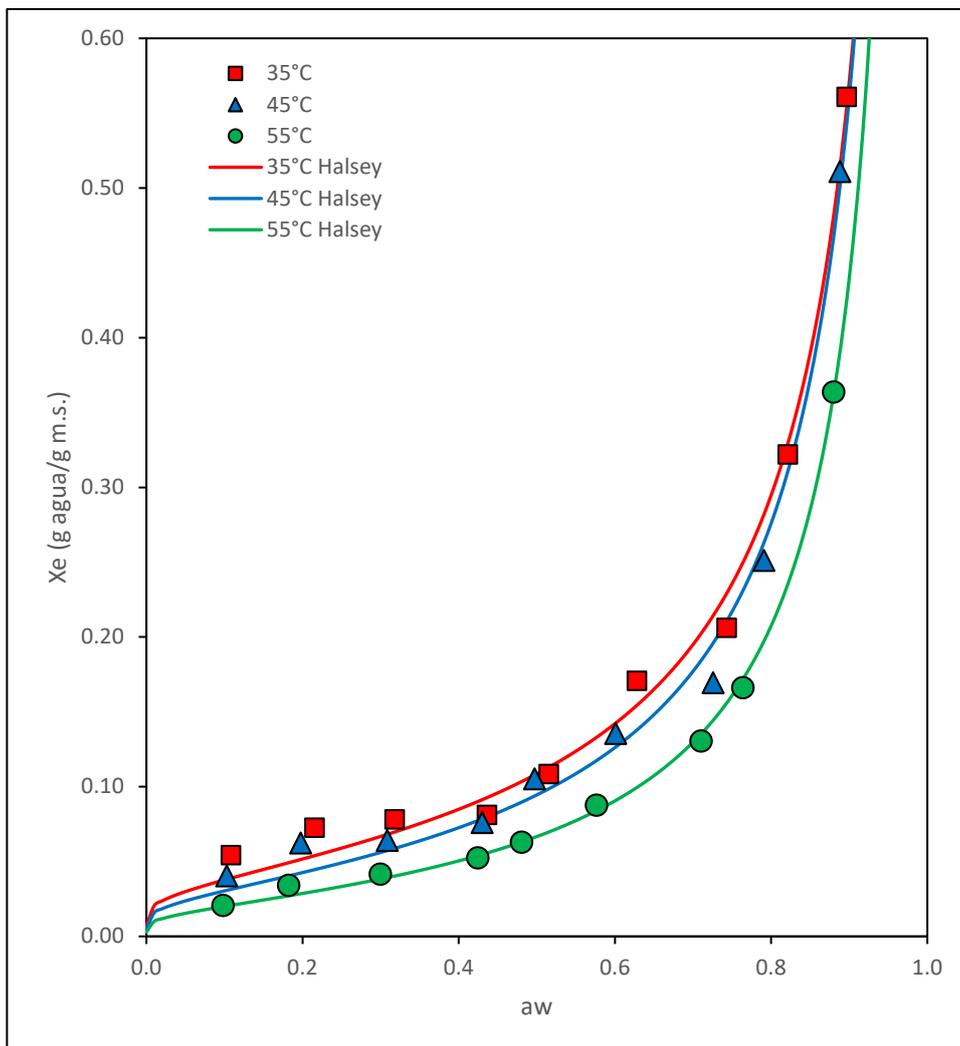


Figura 21. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Halsey

En la Figura 21. observamos que, para la temperatura de 55°C, existe una tendencia lineal hasta el punto 0,48 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial; por otra parte, para las temperaturas experimentales de 45 °C y 35°C, se presenta una tendencia lineal hasta el punto 0,43 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial, mismo comportamiento que en modelo anterior. En términos generales, observamos que, a medida que se incrementa la actividad del agua ( $a_w$ ), la cantidad de agua desorbida ( $X_e$ ) se va incrementando, lo que indica que más agua se libera de las hojas de sachá culantro a mayor  $a_w$ . Asimismo,

notamos que, a una misma actividad del agua, la cantidad de agua desorbida es menor a temperaturas más altas (55°C) comparándola con temperaturas más bajas (35°C). Asimismo, observamos que existe una leve superposición de puntos en las isotermas de 45 y 35°C para los puntos de actividad de agua de 0,43 y 0,5, lo que sugiere que a estas temperaturas y niveles de  $a_w$  se presentan comportamientos similares, esta tendencia no se observa a 55°C. De la misma forma que los modelos anteriores, no se encontraron resultados similares en otros estudios en hojas vegetales; sin embargo si se evidencian comportamientos similares en los estudios de Ayala-Aponte et al., (2012) y González Hurtado et al., (2014), realizados en pitajaya amarilla y jamón de cerdo cocido respectivamente.

Asimismo, presentamos las isotermas de desorción según el modelo Peleg en la Figura 22.

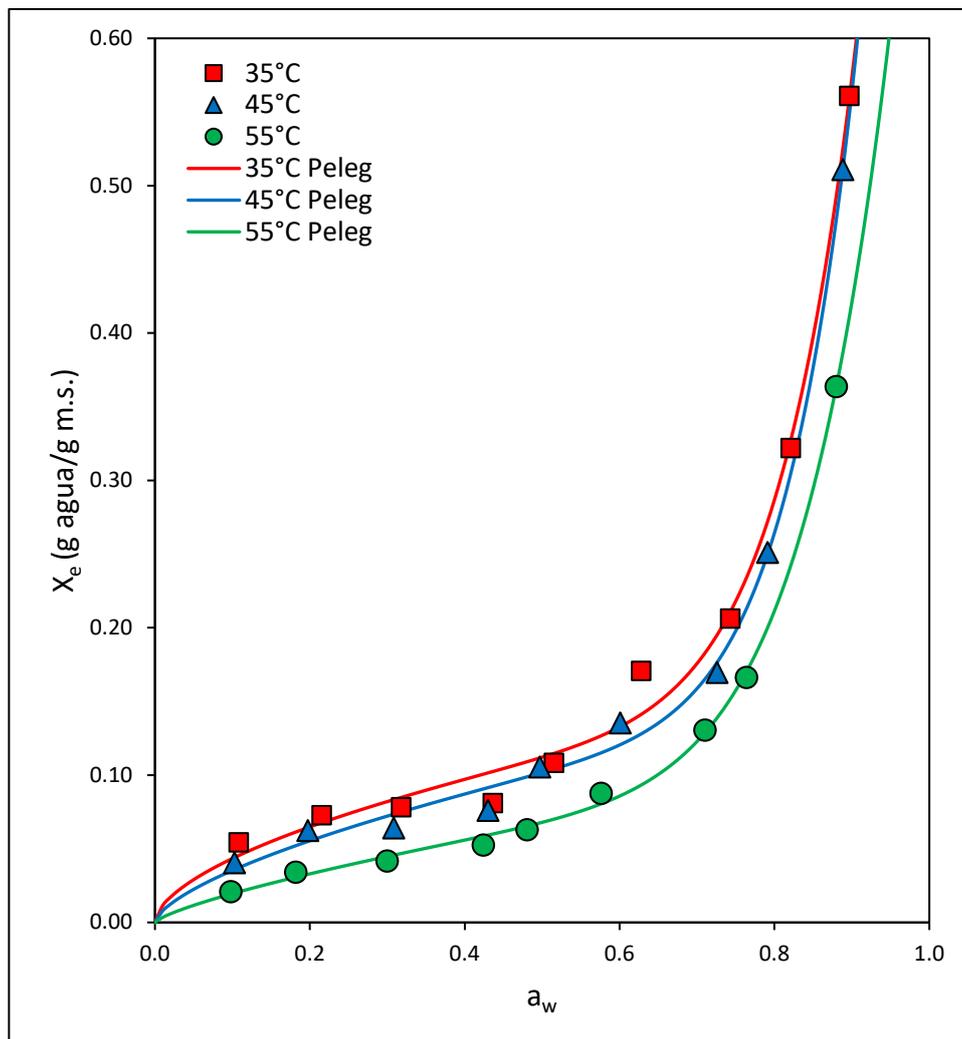


Figura 22. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Peleg

En la Figura 22. observamos que, para la temperatura de 55°C, existe una tendencia lineal hasta el punto 0,48 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial; por otra parte, para las temperaturas experimentales de 45 °C y 35°C, se presenta una tendencia lineal hasta el punto 0,43 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial, mismo comportamiento que en modelo anterior. En términos generales, observamos que, a medida que se incrementa la actividad del agua ( $a_w$ ), la cantidad de agua desorbida ( $X_e$ ) se va incrementando, lo que indica

que más agua se libera de las hojas de sachá culantro a mayor  $a_w$ . Asimismo, notamos que, a una misma actividad del agua, la cantidad de agua desorbida es menor a temperaturas más altas (55°C) comparándola con temperaturas más bajas (35°C). Asimismo, observamos que existe una leve superposición de puntos en las isoterma de 45 y 35°C para los puntos de actividad de agua de 0,43 y 0,5, lo que sugiere que a estas temperaturas y niveles de  $a_w$  se presentan comportamientos similares, esta tendencia no se observa a 55°C. De la misma forma que los modelos anteriores, no se encontraron resultados similares en otros estudios en hojas vegetales; sin embargo si se evidencian comportamientos similares en los estudios de Ayala-Aponte et al., (2012) y González Hurtado et al., (2014), realizados en pitajaya amarilla y jamón de cerdo cocido respectivamente.

Asimismo, presentamos las isotermas de desorción según el modelo Oswin en la Figura 23.

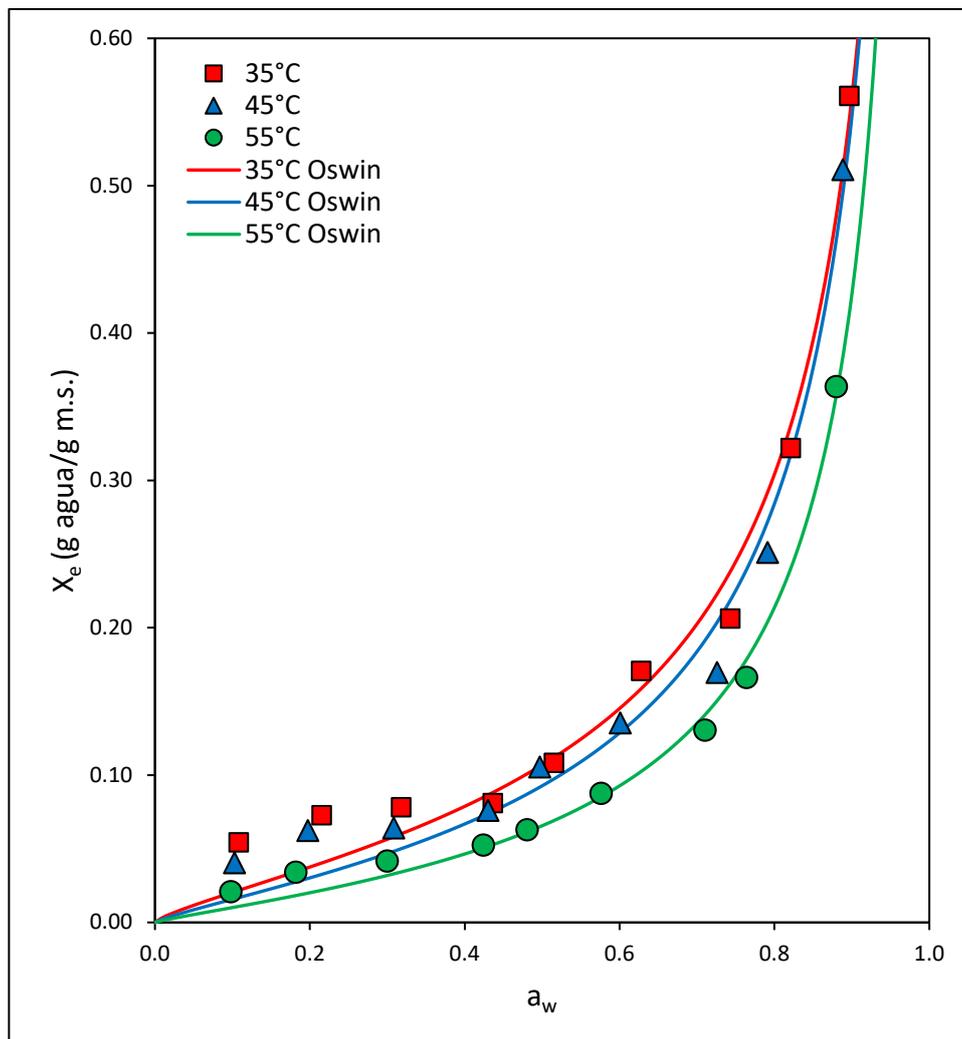


Figura 23. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Oswin

En la Figura 23. observamos que, para la temperatura de 55°C, existe una tendencia lineal hasta el punto 0,48 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial; por otra parte, para las temperaturas experimentales de 45 °C y 35°C, se presenta una tendencia lineal hasta el punto 0,43 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial, mismo comportamiento que en modelo anterior. En términos generales, observamos que, a medida que se incrementa la actividad del agua ( $a_w$ ), la cantidad de agua desorbida ( $X_e$ ) se va incrementando, lo que indica

que más agua se libera de las hojas de sachá culantro a mayor  $a_w$ . Asimismo, notamos que, a una misma actividad del agua, la cantidad de agua desorbida es menor a temperaturas más altas (55°C) comparándola con temperaturas más bajas (35°C). Asimismo, observamos que existe una leve superposición de puntos en las isoterma de 45 y 35°C para los puntos de actividad de agua de 0,43 y 0,5, lo que sugiere que a estas temperaturas y niveles de  $a_w$  se presentan comportamientos similares, esta tendencia no se observa a 55°C. De la misma forma que los modelos anteriores, no se encontraron resultados similares en otros estudios en hojas vegetales; sin embargo si se evidencian comportamientos similares en los estudios de Ayala-Aponte et al., (2012) y González Hurtado et al., (2014), realizados en pitajaya amarilla y jamón de cerdo cocido respectivamente

Asimismo, presentamos las isotermas de desorción según el modelo Henderson en la Figura 24.

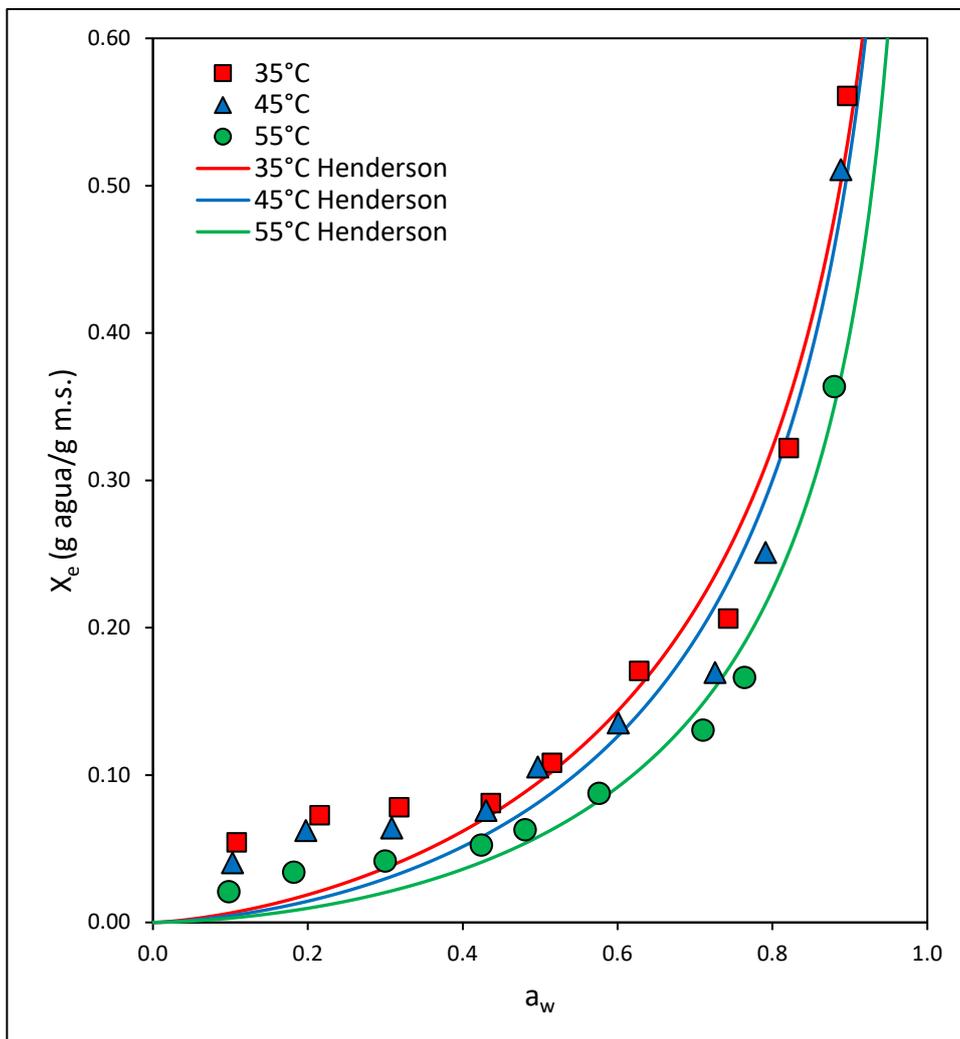


Figura 24. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Henderson.

En la Figura 24. observamos que, para la temperatura de 55°C, existe una tendencia lineal hasta el punto 0,48 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial; por otra parte, para las temperaturas experimentales de 45 °C y 35°C, se presenta una tendencia lineal hasta el punto 0,43 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial, mismo comportamiento que en modelo anterior. En términos generales, observamos que, a medida que se incrementa la actividad del agua ( $a_w$ ), la cantidad de agua desorbida ( $X_e$ ) se va incrementando, lo que indica

que más agua se libera de las hojas de sachá culantro a mayor  $a_w$ . Asimismo, notamos que, a una misma actividad del agua, la cantidad de agua desorbida es menor a temperaturas más altas (55°C) comparándola con temperaturas más bajas (35°C). Asimismo, observamos que existe una leve superposición de puntos en las isoterma de 45 y 35°C para los puntos de actividad de agua de 0,43 y 0,5, lo que sugiere que a estas temperaturas y niveles de  $a_w$  se presentan comportamientos similares, esta tendencia no se observa a 55°C. De la misma forma que los modelos anteriores, no se encontraron resultados similares en otros estudios en hojas vegetales; sin embargo si se evidencian comportamientos similares en los estudios de Ayala-Aponte et al., (2012) y González Hurtado et al., (2014), realizados en pitajaya amarilla y jamón de cerdo cocido respectivamente.

Asimismo, presentamos las isotermas de desorción según el modelo Caurie en la Figura 25.

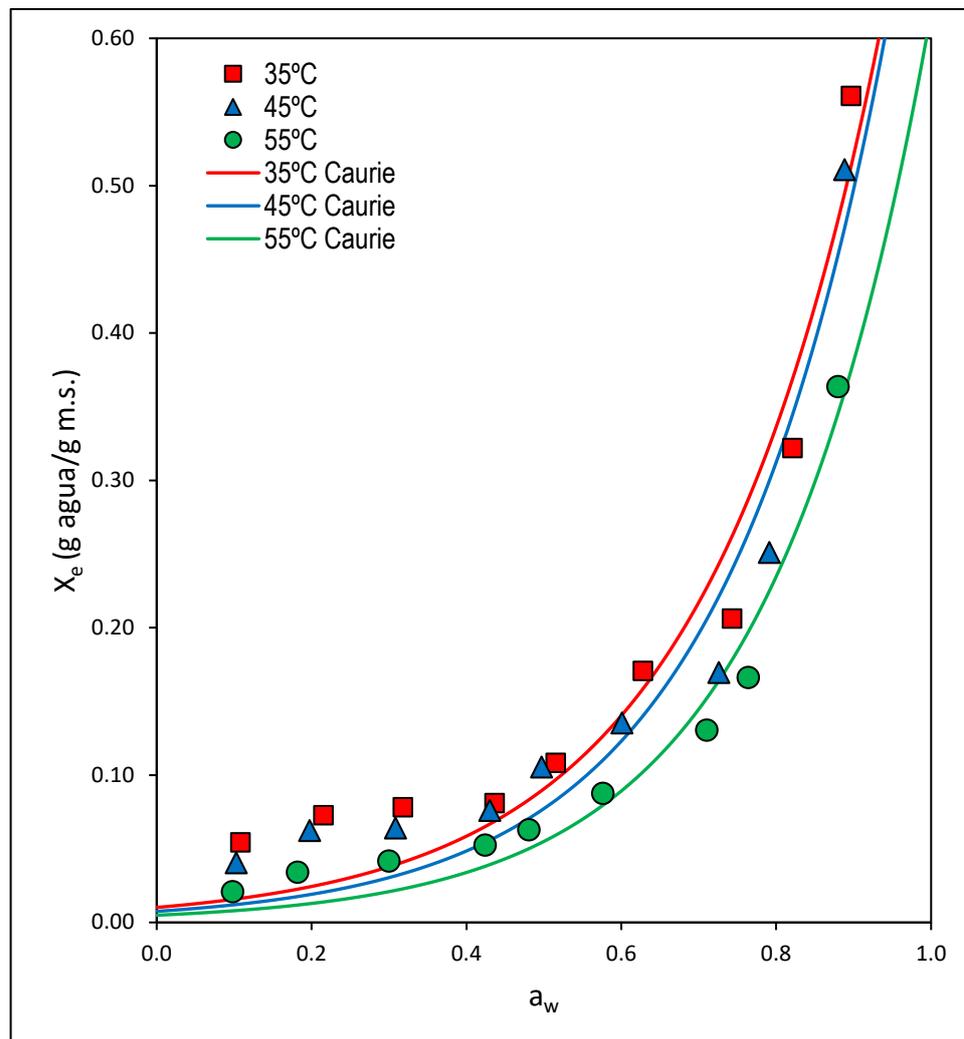


Figura 25. Isotermas de desorción para el sachá culantro a las tres temperaturas de estudio según modelo Oswin

En la Figura 25. observamos que, para la temperatura de 55°C, existe una tendencia lineal hasta el punto 0,48 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial; por otra parte, para las temperaturas experimentales de 45 °C y 35°C, se presenta una tendencia lineal hasta el punto 0,43 de actividad de agua, a partir de este punto, el comportamiento denota una tendencia exponencial, mismo comportamiento que en modelo anterior. En términos generales, observamos que, a medida que se incrementa la actividad del agua ( $a_w$ ), la cantidad de agua desorbida ( $X_e$ ) se va incrementando, lo que indica

que más agua se libera de las hojas de sachá culantro a mayor  $a_w$ . Asimismo, notamos que, a una misma actividad del agua, la cantidad de agua desorbida es menor a temperaturas más altas (55°C) comparándola con temperaturas más bajas (35°C). Asimismo, observamos que existe una leve superposición de puntos en las isotermas de 45 y 35°C para los puntos de actividad de agua de 0,43 y 0,5, lo que sugiere que a estas temperaturas y niveles de  $a_w$  se presentan comportamientos similares, esta tendencia no se observa a 55°C. De la misma forma que los modelos anteriores, no se encontraron resultados similares en otros estudios en hojas vegetales; sin embargo si se evidencian comportamientos similares en los estudios de Ayala-Aponte et al., (2012) y González Hurtado et al., (2014), realizados en pitajaya amarilla y jamón de cerdo cocido respectivamente.

#### 4.2.6. Propiedades termodinámicas de desorción

##### 4.2.6.1. Entalpia diferencial (Calor isostérico de desorción ( $q_{st}$ ) y entropía diferencial ( $\Delta S$ ))

El calor isostérico de desorción es el calor liberado o absorbido cuando una cantidad fija de adsorbato se desorbe del adsorbente a una cobertura superficial constante.

En la Tabla 12. se muestran los valores de calor isostérico de desorción experimentales calculados mediante la ecuación de Tsami.

Tabla 12. Valores de  $q_{st}$  experimentales y calculados mediante la ec° de Tsami

$X_e$	$q_{st}$ exp.	$q_{st}$ cal.
	kJ/mol	kJ/mol
0,039	85,210186	84,878350
0,057	51,306525	49,706305
0,061	42,052212	42,864587
0,070	30,532334	33,213047
0,092	16,455069	16,975319
0,131	8,607484	5,260700
0,169	5,732254	1,712458
0,247	3,211449	0,166748
0,479	1,110168	0,000159

Fuente: Elaboración Propia a partir de la ecuación de Tsami

En la Tabla 12. podemos apreciar que las cifras del calor isostérico experimental son cercanas a los datos del calor isostérico calculado para la mayoría de valores de humedad de equilibrio, diferenciándose a medida que la humedad de equilibrio se incrementa. Esta congruencia, nos lleva a estimar que el modelo de la ecuación de Tsami es adecuado para describir el comportamiento termodinámico de las muestras analizadas.

En la Figura 26. presentamos los valores del “*calor isostérico de desorción*” ( $q_{st}$ ) en relación al contenido de “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ ), calculados usando la ecuación de Tsami

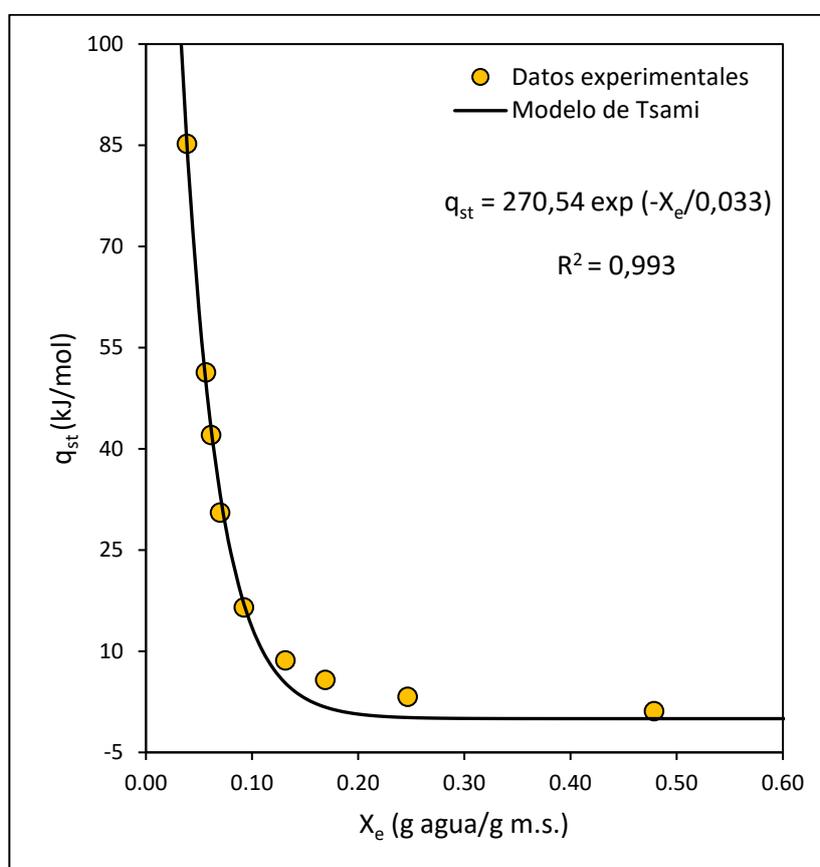


Figura 26. Valores del “*calor isostérico de desorción*” ( $q_{st}$ ) en relación al contenido de “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ )

En la Figura 26. podemos observar que el “*calor isostérico de desorción*” ( $q_{st}$ ) decrece desde 84,042846 a 1,110168 kJ/mol, con el incremento de la  $X_e$  de 0,039 a 0,479 g agua/g m.s. Dado que las hojas de sachá culantro tienen un alto contenido de humedad inicial, es probable que una parte significativa de esta humedad esté adsorbida en sitios de alta energía, como lo sugiere el alto valor inicial de  $q_{st}$ . Este

tipo de agua está fuertemente ligada a la matriz de la hoja, y requiere una mayor cantidad de energía para desorberse. Esta tendencia es similar a la apreciada en el estudio realizado por Borges-Machado et al., (2024) en hojas de grosellero americano, usado con fines medicinales. Asimismo, se observa una tendencia parecida con una curva menos pronunciada al estudiar el calor isostérico en función a la humedad de equilibrio en las semillas de tuna, investigación realizada por Hassini et al., (2015)

Los parámetros considerados para los cálculos en la ecuación de Tsami, se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. parámetros considerados para los cálculos en la ecuación de Tsami

Parámetros de Tsami	
$q_0 =$	270,540
$X_0 =$	0,03336
$R^2 =$	0,99332

Fuente: Elaboración Propia a partir de la ecuación de Tsami

De la misma forma, considerando que la entropía diferencial nos da información sobre cómo cambia el desorden del sistema a medida que se desorbe una pequeña cantidad de adsorbato, presentamos en la Tabla 14. los valores de entropía diferencial

Tabla 14. Entropía diferencial ( $\Delta S$ )

$X_e$	$\Delta S$ exp.	$\Delta S$ cal.
	(kJ/mol K)	(kJ/mol/K)
0,039	0,2473249	0,247040758
0,057	0,1487957	0,143176895
0,061	0,1213179	0,123115263
0,070	0,0871723	0,094923058
0,092	0,0458625	0,047887658
0,131	0,0233091	0,014506903
0,169	0,0152088	0,004620522
0,247	0,0082217	0,000430029
0,479	0,0025067	0,000000358

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 14. podemos apreciar que las cifras de la entalpía diferencial experimental son cercanas a los datos de la entalpía diferencial calculada para la mayoría de valores de “*humedad de equilibrio*”, diferenciándose a medida que la humedad de equilibrio se incrementa. Esta congruencia, nos lleva a estimar que el modelo matemático usado es adecuado para describir el comportamiento termodinámico de las muestras analizadas.

En la Figura 27. presentamos los valores de entropía diferencial en relación al contenido de “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ ).

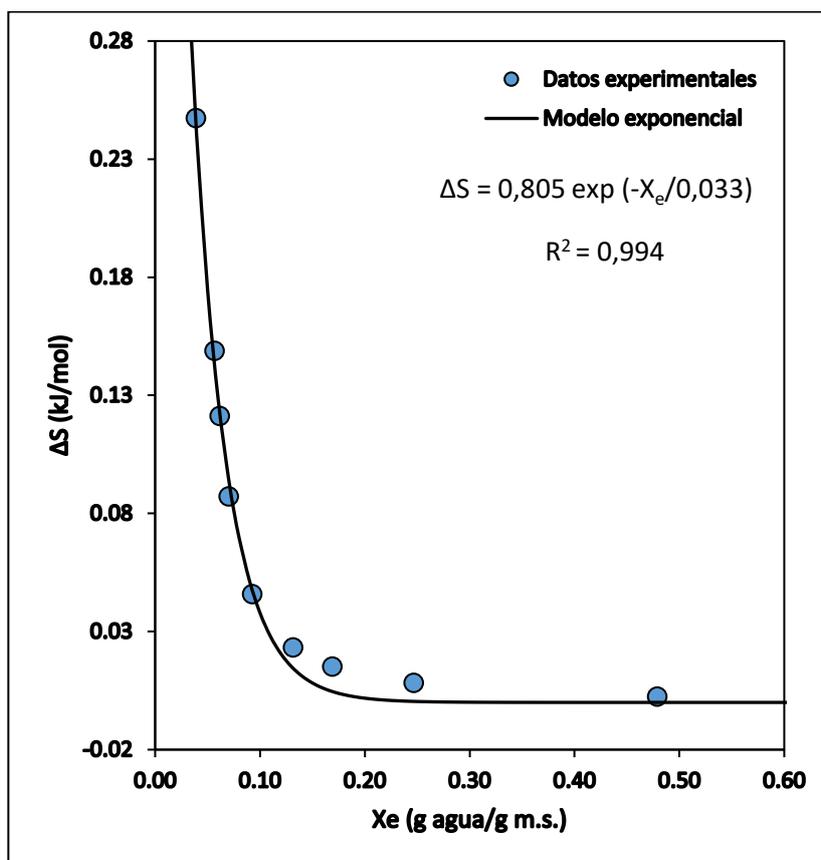


Figura 27. Valores de entropía diferencial en relación al contenido de “*humedad de equilibrio*” ( $X_e$ ).

En la Figura 27. podemos observar que la entropía diferencial decrece desde 0,128733 a 0,0025067 kJ/mol, con el aumento de la  $X_e$  de 0,06 a 0,479 g agua/g m.s. En términos generales, el cambio de entropía  $\Delta S$  disminuye exponencialmente con el aumento del contenido de agua. Esto significa que a bajos niveles de  $X_e$ , el agua está presente en cantidades limitadas en la matriz de la hoja. En este estado, las

moléculas de agua tienen mayor libertad de movimiento y, por tanto, mayor desorden, lo que se refleja en una entropía diferencial relativamente alta, este comportamiento, sugiere que el agua no está fuertemente ligada a la matriz del sólido y tiene una movilidad considerable. Por otra parte, a medida que aumenta  $X_e$ , el agua comienza a ocupar los sitios de unión más energéticamente favorables en la matriz de la hoja. Las interacciones entre las moléculas de agua y los componentes de la hoja, como las paredes celulares y los componentes intracelulares, se vuelven más fuertes y organizadas. Esto reduce la libertad de movimiento de las moléculas de agua con la consecuente disminución de la entropía diferencial, por lo cual, el sistema se vuelve más ordenado y menos caótico.

El hecho de que la “*entropía diferencial*” disminuya exponencialmente con el incremento del contenido de agua sugiere una rápida transición hacia un estado más ordenado a medida que se introduce más agua. En términos de la desorción, este comportamiento puede interpretarse como una indicación de que las primeras moléculas de agua eliminadas o desorbidas son las más móviles y menos asociadas con la estructura de la hoja. A medida que se desorbe más agua, las moléculas restantes están más fuertemente unidas, y el sistema alcanza un estado más estructurado y con menor entropía. Esto es consistente con la naturaleza estructural de las hojas de vegetales en general, donde el agua inicialmente interactúa débilmente con la matriz, pero se vuelve más estructurada y menos entrópicamente favorecida a medida que se ocupa más espacio dentro de la matriz sólida.

Tendencias similares en el fenómeno de desorción se observaron en investigaciones con otros alimentos tales como semillas de tuna (Hassini et al., 2015), cuya disminución de la entropía diferencial gráficamente es menos prominente que el presente estudio, esto puede deberse, entre otras cosas, a la diferencia de los componentes mayoritarios entre los productos comparados; de la misma forma, una tendencia muy similar se presenta en las hojas de taioba (planta comestible de origen brasilero) estudiadas por (Borges-Machado et al., 2024), en la cual se evidencian cambios más pronunciados en las regiones donde el contenido de humedad es inferior a 0,2 kg de agua por kilogramo de materia seca, lo que indica que se necesita una mayor dotación de energía para eliminar el agua en estas situaciones.

De la misma forma, considerando que la “*teoría de compensación entalpía-entropía*” plantea que hay una interdependencia entre  $\Delta H$  y  $\Delta S$  de tal manera que las variaciones en una de estas magnitudes se compensan en parte por variaciones en la otra, lo cual tiene una alta implicancia en sistemas biológicos, especialmente en la cinética enzimática, se muestran los datos experimentales de la relación entalpía-entropía en la Tabla 15.

Tabla 15. Teoría de compensación Entalpía-Entropía

$\Delta S$ exp. (kJ/mol K)	$q_{st}$ exp. (KJ/mol)
0,2473	85,2102
0,1488	51,3065
0,1213	42,0522
0,0872	30,5323
0,0459	16,4551
0,0233	8,6075
0,0152	5,7323
0,0082	3,2114
0,0025	1,1102

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 15 podemos apreciar que el calor isostérico de desorción disminuye cuando decrece la entropía y viceversa. La “*entropía diferencial*” disminuye progresivamente desde 0,2473 kJ/mol·K hasta 0,0025 kJ/mol·K, lo cual indica una reducción en el desorden del sistema a medida que progresa el proceso de desorción. Los valores de entalpía también disminuyen, desde 85,2102 kJ/mol hasta 1,1102 kJ/mol; los valores más altos al inicio sugieren que, en las primeras etapas de la desorción, se necesita una dotación mayor de energía para liberar las moléculas de agua, que probablemente están unidas en sitios de alta energía dentro de la estructura vegetal. A medida que progresa la desorción, la energía requerida disminuye, lo que indica que el agua restante está menos fuertemente unida o en sitios de menor energía.

La disminución simultánea tanto en la entalpía como en la entropía diferencial sugiere que la desorción del agua de las hojas de Sacha culantro sigue un proceso en el que la reducción del contenido de agua lleva a un estado más ordenado y menos energéticamente demandante.

En la Figura 28. presentamos los valores de la relación entre el “calor isostérico” ( $q_{st}$ ) y el cambio de entropía ( $\Delta S$ ).

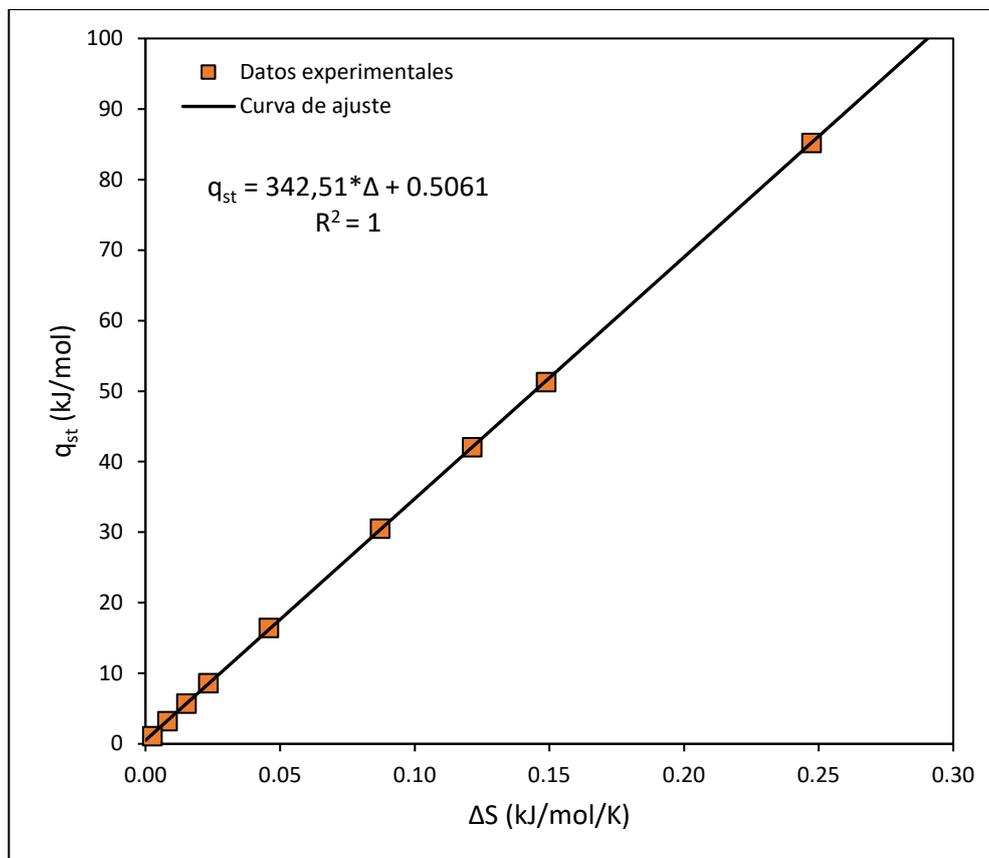


Figura 28. Relación entre el calor isostérico ( $q_{st}$ ) y el cambio de entropía ( $\Delta S$ ).

En la Figura 28. podemos observar que existe una relación lineal entre el calor isostérico  $q_{st}$  y la variación de la entropía  $\Delta S$ , así, un aumento en  $q_{st}$  está acompañado por un aumento correspondiente en  $\Delta S$ ; en términos generales se observa una relación es muy robusta dentro del rango de los datos experimentales.

La “teoría de compensación entalpía-entropía” establece que existe una relación lineal entre la entalpía y la entropía, lo que implica que la energía requerida para desorber el agua está relacionada con el nivel de desorden del sistema. En este caso, la compensación parece alinearse con una tendencia exponencial decreciente, lo que es común en procesos de desorción donde las interacciones entre el agua y la matriz sólida son inicialmente fuertes y se debilitan a medida que progresa la desorción. Tendencias similares se observaron en los fenómenos de desorción estudiados por

Borges-Machado et al., (2024) y Hassini et al., (2015) en hojas de taioba y semillas de tuna respectivamente.

Por otra parte, el valor de “*humedad de la monocapa*” ( $X_m$ ) obtenido mediante los modelos de GAB y BET mostrados en las Tablas 6 y 11 es relevante porque denota la concentración de agua que se encuentra fuertemente adsorbida a los sitios específicos en la superficie de las hojas de sachá culantro, y constituye un valor importante para asegurar su estabilidad. Así, los valores experimentales de  $X_m$  de las hojas de sachá culantro varían de 0,0469 a 0,0651 g agua/g m.s. en la adsorción y de 0,0376 a 0,0556 g agua/g m.s en la desorción de acuerdo con el modelo de GAB. De acuerdo al modelo BET, la  $X_m$  de las hojas de sachá culantro varía de 0,0433 a 0,0507 g agua/g m.s. en la adsorción y de 0,0445 a 0,0578 g agua/g m.s en la desorción.

## CONCLUSIONES

- Al evaluar las isothermas de sorción (desorción y adsorción) de las hojas de sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.) a diferentes temperaturas y la humedad se observó que la humedad de equilibrio de las hojas de sachá culantro presentó una tendencia directamente proporcional con la actividad de agua e inversamente proporcional al aumento de la temperatura para un mismo valor de “*actividad de agua*” de manera similar a otros productos vegetales, por lo cual se concluye que la humedad y la temperatura tienen efectos en las condiciones de almacenamiento de las hojas.
- Las “*isothermas de adsorción y desorción*” del sachá culantro presentaron un comportamiento del tipo II.
- El modelo matemático de GAB mostró mejor ajuste en las isothermas de adsorción con valores de  $R^2$  mayores a 99%, y E(%) menores a 10%, la humedad del producto debe estar hasta 0.0651 g agua/g m.s. con una humedad relativa de hasta 56% para temperaturas de almacenamiento entre 25 a 55 °C
- El modelo matemático de GAB mostró mejor ajuste en la isoterma de desorción con valores de  $R^2$  mayores a 99% y (E%) menores a 10%, la humedad del producto debe estar hasta 0,0556 g agua/g m.s con una humedad relativa de hasta 43% para temperaturas de almacenamiento entre 35 a 55 °C.
- valores de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) por medio de los modelos de GAB y BET los cuales varían de 0,0469 a 0,0651 g agua/g m.s. en la adsorción y de 0,0376 a 0,0556 g agua/g m.s en la desorción de acuerdo con el modelo de GAB. De acuerdo al modelo BET, la  $X_m$  de las hojas de sachá culantro varía de 0,0433 a 0,0507 g agua/g m.s. en la adsorción y de 0,0445 a 0,0578 g agua/g m.s en la desorción.

- Se determinaron las propiedades termodinámicas; se identificó que el calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ) decrece con el aumento del contenido de humedad las hojas de sachá culantro desde 50,2257054 a 0,91113126 kJ/mol para humedades de 0.073 a 0.39 g agua/g m.s. respectivamente. Por otra parte, la entropía diferencial en la adsorción decrece desde 0,14437261 a 0,001875638 kJ/mol, con el aumento de la  $X_e$  de 0.073 a 0.39 g agua/g m.s. El calor isostérico de desorción ( $q_{st}$ ) decrece desde 85,210186 a 1,110168 kJ/mol, con el aumento de la  $X_e$  de 0,039 a 0,479 g agua/g m.s. La entropía diferencial en la desorción decrece desde 0,2473249 a 0,0025067 kJ/mol, con el aumento de la  $X_e$  de 0,039 a 0,479 g agua/g m.s.

### **SUGERENCIAS**

- Realizar investigaciones destinadas al aprovechamiento integral de las hojas de sachá culantro utilizando mecanismos de conservación tales como la liofilización.
- Realizar investigaciones destinadas a evaluar la estabilidad de los compuestos bioactivos de las hojas de sachá culantro en función a tecnologías de secado.
- Realizar estudios para definir los tiempos de vida útil de las hojas de sachá culantro en anaquel a las condiciones sugeridas en la presente investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.O.A.C. (1990). "Association of official Analytical Chemist". Arlington, VA, USA.
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. *Food and Bioproducts Processing*, 80(2), 118-128. <https://doi.org/10.1205/09603080252938753>
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2004). Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. *Journal of Food Engineering*, 62(2), 135-142. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00202-4)
- Aponte, A. A. (2011). Estimación de las isothermas de adsorción y del calor isostérico en harina de yuca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 9(1), Article 1.
- Aviara, N. A., Ajibola, O. O., & Dairo, U. O. (2002). PH—Postharvest Technology: Thermodynamics of Moisture Sorption in Sesame Seed. *Biosystems Engineering*, 83(4), 423-431. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0124>
- Ayala-Aponte, A. A., Serna Cock, L., & Rodriguez, G. (2012). ISOTERMAS DE DESORCION DE HUMEDAD EN PITAHAYA AMARILLA (*Selenicereus megalanthus*). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 135-143.
- Basilio-Atencio, J., & Flores-Ayala, J. (2021). Optimización de parámetros para la deshidratación por lecho fluidizado del sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.). *Revista de investigación Agropecuaria Science and Biotechnology*, 1(3), Article 3. <https://doi.org/10.25127/riagrop.20213.700>

- Basu, S., Shivhare, U. S., & Mujumdar, A. S. (2006). Models for sorption isotherms for foods: A review. *Drying Technology*, 24(8), 917-930.  
<https://doi.org/10.1080/07373930600775979>
- Bensebia, O., & Allia, K. (2016a). Analysis of adsorption–desorption moisture isotherms of rosemary leaves. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 3(3), 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2016.01.005>
- Bensebia, O., & Allia, K. (2016b). Analysis of adsorption–desorption moisture isotherms of rosemary leaves. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 3(3), 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2016.01.005>
- Borges-Machado, A. L., Neves-Martins, M. J., Ribeiro-Sanches, M. A., Pereira, L. S., dos Santos, P. A., & Telis-Romero, J. (2024). Desorption properties of taioba (*Xanthosoma taioba* E.G. Gonç.) leaves: A non-conventional edible plant. *Food Bioscience*, 59, 104093.  
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104093>
- Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Neves-Martins, M. J., dos Santos, P. A., Luna-Solano, G., & Telis-Romero, J. (2024). Water desorption isotherms and thermodynamic properties of Ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller). *LWT*, 193, 115749. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115749>
- Carvalho Lago, C., & Noreña, C. P. Z. (2015). Thermodynamic analysis of sorption isotherms of dehydrated yacon (*Smallanthus sonchifolius*) bagasse. *Food Bioscience*, 12, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.07.001>
- Castro-Alayo, E. M., Chávez-Quintana, S. G., Auquiñivín-Silva, E. A., Fernández-Jeri, A. B., Cruz, O. A.-D. la, Rodríguez-Hamamura, N., Olivas-Orozco, G. I., & Sepúlveda-Ahumada, D. R. (2019). Aceites esenciales de plantas nativas del Perú: Efecto del lugar de cultivo en las características fisicoquímicas y

actividad antioxidante. *Scientia Agropecuaria*, 10(4), 479-487.

<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.04>

Červenka, L., Hloušková, L., & Žabčíková, S. (2015). Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of green and roasted Yerba mate (*Ilex paraguariensis*). *Food Bioscience*, 12, 122-127.

<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.10.001>

Costa, D. C., Costa, H. S., Albuquerque, T. G., Ramos, F., Castilho, M. C., & Sanches-Silva, A. (2015). Advances in phenolic compounds analysis of aromatic plants and their potential applications. *Trends in Food Science and Technology*, 45(2), 336-354. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.06.009>

Fasina, O. O. (2006). Thermodynamic properties of sweetpotato. *Journal of Food Engineering*, 75(2), 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.004>

FASINA, O. O., AJIBOLA, O. O., & TYLER, R. T. (1999). THERMODYNAMICS OF MOISTURE SORPTION IN WINGED BEAN SEED AND GARI. *Journal of Food Process Engineering*, 22(6), 405-418. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1999.tb00496.x>

Fernández, Y. O. H., García, A. S., & León, M. V. (2021). Isotherma de adsorción de moléculas de agua en hojas secas de *Justicia pectoralis* Jacq. (Tilo). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 26(4). <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=112437>

Gabas, A. L., Telis-Romero, J., Giraldo-Gómez, G. I., & Telis, V. R. N. (2009). Propiedades termodinámicas de sorción de agua de la pulpa de lulo en polvo con encapsulantes. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 29(4), 911-918. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000400032>

- Gálvez, A. V., Aravena, E. L., & Mondaca, R. L. (2006). Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 26(4), 821-827. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000400017>
- García Navarrete, F. J. (2014). *Evaluación de los efectos del proceso de secado sobre la calidad de la Stevia (Stevia rebaudiana Bertoni) y la Hierbabuena (Mentha spicata)*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/48575>
- García, S. V., Schmalko, M. E., & Tanzariello, A. (2007). Isotermas de adsorción y cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en Misiones. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 36(1), 115-129.
- Gil, J., Muratona, S., Yacanto, P., Soteras, E. M., Abaca, C., & Sustersic, M. G. (2013). Isotermas de adsorción y desorción de agua en leche descremada en polvo. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(1), 51-59.
- GONZÁLEZ HURTADO, M. I., PORRAS BARRIENTOS, L. D., AGUDELO FLÓREZ, A. C., QUINTERO CARDONA, O. A., & DIOSA QUINTERO, C. F. (2014). *Determinación de isotermas de desorción en jamón de cerdo cocido almacenado entre 4°C y 12°C | Vitae*. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/vitae/article/view/16604>
- Hassini, L., Bettaieb, E., Desmorieux, H., Torres, S. S., & Touil, A. (2015). Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. *Industrial Crops and Products*, 67, 457-465. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.078>
- Heredia Baca, J. A. (2002). Deshidratación del sachá culantro (*Eryngium foetidum* L.), por flujo de aire caliente. *Repositorio - UNSM*. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/59>

- Hernández-Sampieri, R. (2019). *Metodología de la investigación, las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta – 6ta edición*. <https://yoadp.com/ices/libro-metodologia-de-la-investigacion-6ta-edicion/>
- Hilbay, R., Armas, S. E. C., Escudero, M. A. G., & Cabrera, T. A. P. (2016). Reingeniería en los procesos de secado, molienda y tamizado de plantas aromáticas para mejorar la calidad de los derivados, caso: Empresa JAMBI KIWA. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.47>
- IGLESIAS, H. A., CHIRIFE, J., & VIOLLAZ, P. (1976). Thermodynamics of water vapour sorption by sugar beet root. *International Journal of Food Science & Technology*, 11(1), 91-101. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1976.tb00705.x>
- Jaramillo, B. E., Duarte, E., & Martelo, I. (2011). *Composición química volátil del aceite esencial de Eryngium foetidum L. colombiano y determinación de su actividad antioxidante*.
- Kammoun Bejar, A., Boudhrioua Mihoubi, N., & Kechaou, N. (2012). Moisture sorption isotherms—Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves. *Food Chemistry*, 132(4), 1728-1735. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.06.059>
- KATZ, E. E., & LABUZA, T. P. (1981). Effect of Water Activity on the Sensory Crispness and Mechanical Deformation of Snack Food Products. *Journal of Food Science*, 46(2), 403-409. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb04871.x>

- Kaya, S., & Kahyaoglu, T. (2007). Moisture sorption and thermodynamic properties of safflower petals and tarragon. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 413-421. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.009>
- Krug, R. R., Hunter, W. G., & Grieger, R. a. (1976). Enthalpy-Entropy Compensation. 1. Some Fundamental Statistical Problems Associated with the Analysis. *Journal of physical chemistry*, 80(2), 2335-2341. <https://doi.org/10.1021/j100562a006>
- LABUZA, T. P., KAAANANE, A., & CHEN, J. Y. (1985). Effect of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods. *Journal of Food Science*, 50(2), 385-392. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13409.x>
- Linné, C. von. (1753). *Species plantarum: Exhibentes plantas rite cognitatas ad genera relatas, cum differentiis specificis, nominibus trivialibus, synonymis selectis, locis natalibus, secundum systema sexuale digestas* (pp. 1-570). Junk. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.37656>
- Machhour, H., Idlimam, A., Mostafa, M., Hadrami, I., & Mounir, K. (2012). Sorption isotherms and thermodynamic properties of peppermint tea (*Mentha piperita*) after thermal and biochemical treatment. *Journal of Materials and Environmental Science*, 3, 232-247.
- Martínez-Las Heras, R., Heredia, A., Castelló, M. L., & Andrés, A. (2014). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of dry persimmon leaves. *Food Bioscience*, 7, 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2014.06.002>
- McMinn, W. A. M., Al-Muhtaseb, A. H., & Magee, T. R. A. (2005). Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. *Food Research International*, 38(5), 505-510. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.11.004>

- Öztekin, S., Başçetinçelik, A., & Soysal, Y. (1999). Crop drying programme in Turkey. *Renewable Energy*, 16(1-4-4 pt 2), 789-794.  
[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00282-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00282-1)
- Paul, J. H. A., Seaforth, C. E., & Tikasingh, T. (2011). *Eryngium foetidum* L.: A review. *Fitoterapia*, 82(3), 302-308.  
<https://doi.org/10.1016/j.fitote.2010.11.010>
- Pergher, G., Schmalko, M., & de Battista, G. (2016). *Parámetros Fisicoquímicos e Isotermas de Adsorción de Hojas de Especies Silvestres de Maytenus ilicifolia Martius*. 20-27.
- Puente Vigo, S. L. (2019). *Compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de extractos de hoja de sacha culantro (Eryngium foetidum L.) y de aceite de copaiba (Copaifera paupera) procedentes de la provincia de Coronel Portillo, Ucayali*.
- Pulla, P. V. (2011). *Determinación de las isotermas de adsorción del ají (Capsicum annum L.) seco*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú.
- Quirijns, E. J., van Boxtel, A. J., van Loon, W. K., & van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(11), 1805-1814.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.2140>
- Ramírez-Miranda, M., Cruz y Victoria, M. T., Vizcarra-Mendoza, M. G., & Anaya-Sosa, I. (2014). Determinación de las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz nixtamalizada. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13(1), 165-178.

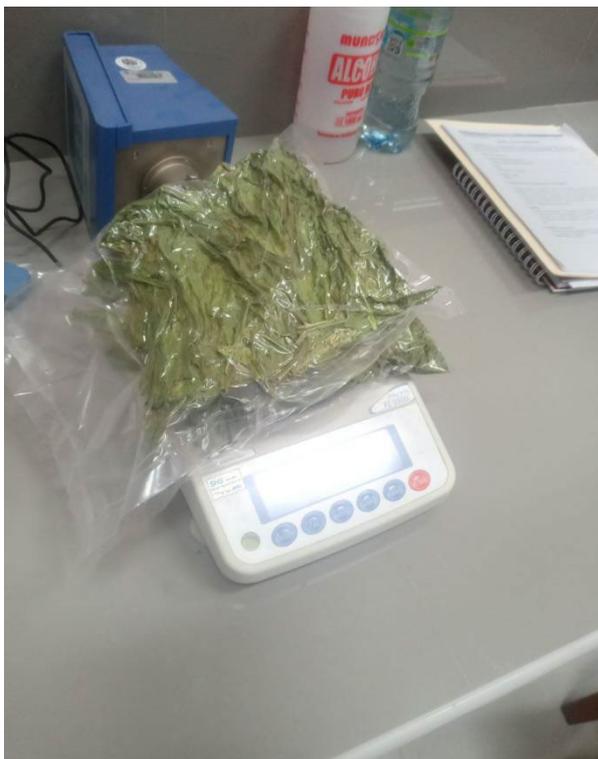
- Rizvi, S. S. H., & Benado, A. L. (1983). Thermodynamic Analysis of Drying Foods. *Drying Technology*, 2(4), 471-502.  
<https://doi.org/10.1080/07373938408959849>
- Roby, M. H. H., Sarhan, M. A., Selim, K. A. H., & Khalel, K. I. (2013). Evaluation of antioxidant activity, total phenols and phenolic compounds in thyme (*Thymus vulgaris* L.), sage (*Salvia officinalis* L.), and marjoram (*Origanum majorana* L.) extracts. *Industrial Crops and Products*, 43(1), 827-831.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.029>
- Russo, P., Adiletta, G., & Di Matteo, M. (2013). The influence of drying air temperature on the physical properties of dried and rehydrated eggplant. *Food and Bioproducts Processing*, 91(3), 249-256.  
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.10.005>
- Sáenz, M. T., Fernández, M. A., & García, M. D. (1997). Antiinflammatory and analgesic properties from leaves of *Eryngium foetidum* L. (Apiaceae). *Phytotherapy Research*, 11(5), 380-383. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1573\(199708\)11:5<380::AID-PTR116>3.0.CO;2-#](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1573(199708)11:5<380::AID-PTR116>3.0.CO;2-#)
- Singh, S., Singh, D. R., Salim, K. M., Srivastava, A., Singh, L. B., & Srivastava, R. C. (2011). Estimation of proximate composition, micronutrients and phytochemical compounds in traditional vegetables from Andaman and Nicobar Islands. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(7), 765-773. <https://doi.org/10.3109/09637486.2011.585961>
- Siqueira-de-Lima, M., Cagnin, C., Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Telis-Romero, J., & Resende, O. (2024). Thermodynamic approach on water vapor sorption of *Curcuma longa* L. flour. *LWT*, 206, 116592.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116592>

- Souza, K. (2016). *Potencial antioxidante, mineral, inibitório de enzimas  $\alpha$ -Amilase e lipoxigenase e composição centesimal de espécies da família apiaceae*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil.
- Soysal, Y., & Oztekin, S. (1999). Equilibrium Moisture Content Equations for some Medicinal and Aromatic Plants. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(3), 317-324. <https://doi.org/doi:10.1006/jaer.1999.0463>
- Tafur Pereda, H. J. (2018). Modelamiento de la cinética de secado de las hojas de sachaculantro (*Eryngium Foetidum L.*) por convección forzada. *Universidad Nacional Agraria de la Selva*.  
<http://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/1600>
- TSAMI, E., MAROULIS, Z. B., MARINOS-KOURIS, D., & SARAVACOS, G. D. (1990). Heat of sorption of water in dried fruits. *International Journal of Food Science & Technology*, 25(3), 350-359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01092.x>
- Velázquez-Gutiérrez, S. K., Figueira, A. C., Rodríguez-Huezo, M. E., Román-Guerrero, A., Carrillo-Navas, H., & Pérez-Alonso, C. (2015). Sorption isotherms, thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (*Salvia hispanica L.*). *Carbohydrate Polymers*, 121, 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.11.068>
- Yogendrarajah, P., Samapundo, S., Devlieghere, F., De Saeger, S., & De Meulenaer, B. (2015). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of whole black peppercorns (*Piper nigrum L.*). *LWT - Food Science and Technology*, 64(1), 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.045>

Zainol, M. K., Abd-Hamid, A., Yusof, S., & Muse, R. (2005). Antioxidative activity and total phenolic compounds of leaf, root and petiole of four accessions of *Centella asiatica* (L.) urban. En *World Journal of Gastroenterology* (Vol. 11, Número 4). [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00498-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00498-3)

## ANEXOS

### ANEXO FOTOGRÁFICO





# ANALISIS FISCOQUIMICOS

## LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



### INFORME DE ENSAYOS

N° 004028 - 2023

SOLICITANTE : CECILIA PRISCA COLLQUESAÑA APAZA  
DIRECCIÓN LEGAL : JR.LOS MIRABLES N°1313  
RUC: 43087505 Teléfono: 987776728  
PRODUCTO : SACHACULANTRO  
NÚMERO DE MUESTRAS : Uno  
IDENTIFICACIÓN/MTRA. : M1  
CANTIDAD RECIBIDA : 669,6 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante.  
MARCA(S) : S.M.  
FORMA DE PRESENTACIÓN : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente.  
SOLICITUD DE SERVICIO : S/S N°EN-003115 -2023  
REFERENCIA : PERSONAL  
FECHA DE RECEPCIÓN : 13/10/2023  
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO/QUÍMICO  
PERÍODO DE CUSTODIA : No aplica

#### RESULTADOS :

#### ENSAYOS FÍSICOS/QUÍMICOS :

ALCANCE : N.A.

ENSAYO	RESULTADO
1.- Humedad (g / 100 g de muestra original)	88,0
2.- Grasa (g / 100 g de muestra original)	0,5
3.- Cenizas(g / 100 g de muestra original)	1,8
4.- Fibra Cruda(g / 100 g de muestra original)	1,8
5.- % Kcal. proveniente de Carbohidratos	60,0
6.- % Kcal. proveniente de Grasa	10,4
7.- % Kcal. proveniente de Proteínas	29,6
8.- Energía Total(Kcal / 100 g de muestra original)	43,3
9.- Carbohidratos(g / 100 g de muestra original)	6,5
10.- Proteína(g / 100 g de muestra original) (Factor: 6.25)	3,2

#### MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO :

- 1.- AOAC 925.10 Cap. 32, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 2.- AOAC 922.06 Cap. 32, Pág. 5, 21st Edition 2019
- 3.- AOAC 930.05 Cap. 3, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 4.- NTP 205.003:1980 (Revisada el 2011)
- 5.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 6.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 7.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 8.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 9.- Por Diferencia MS-INN Collazos 1993
- 10.- AOAC 920.152 Cap. 37, Pág. 10, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 13/10/2023 Al 23/10/2023.

CONTINÚA INFORME DE ENSAYOS N° 004028 - 2023

Pág 1/2

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú  
Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322

E-mail: [lmcti.ventas.servicios@lamolina.edu.pe](mailto:lmcti.ventas.servicios@lamolina.edu.pe) - Página Web: [www.lamolina.edu.pe/calidadtotal](http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal)

la molina calidad total



**LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

*Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos*



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

**INFORME DE ENSAYOS**

**N° 004028 - 2023**

**ADVERTENCIA :**

- 1 - El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
- 2 - Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
- 3 - Válido sólo para la cantidad recibida. No es un Certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 23 de Octubre de 2023



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - UNALM

*Lourdes Margarita Barco Saidaña*  
Biol. Lourdes Margarita Barco Saidaña  
Directora Técnica (e)  
CEP - N° 01232



**LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

*Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos*



**INFORME DE ENSAYOS**

**N° 004027 - 2023**

**SOLICITANTE** : CECILIA PRISCA CCOLLQUESAÑA APAZA  
**DIRECCIÓN LEGAL** : JR.LOS MIRABLES N°1313  
: RUC: 43087505 Teléfono: 987776728  
**PRODUCTO** : SACHACULANTRO  
**NÚMERO DE MUESTRAS** : Uno  
**IDENTIFICACIÓN/MTRA.** : M3  
**CANTIDAD RECIBIDA** : 875,2 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante.  
**MARCA(S)** : S.M.  
**FORMA DE PRESENTACIÓN** : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente.  
**SOLICITUD DE SERVICIO** : S/S N°EN-003114 -2023  
**REFERENCIA** : PERSONAL  
**FECHA DE RECEPCIÓN** : 13/10/2023  
**ENSAYOS SOLICITADOS** : FÍSICO/QUÍMICO  
**PERÍODO DE CUSTODIA** : No aplica

**RESULTADOS :**

**ENSAYOS FÍSICOS/QUÍMICOS :**

**ALCANCE** : N.A.

ENSAYO	RESULTADO
1.- Humedad (g / 100 g de muestra original)	87,9
2.- Grasa (g / 100 g de muestra original)	0,6
3.- Cenizas(g / 100 g de muestra original)	1,8
4.- Fibra Cruda(g / 100 g de muestra original)	1,7
5.- % Kcal. proveniente de Carbohidratos	62,4
6.- % Kcal. proveniente de Grasa	12,2
7.- % Kcal. proveniente de Proteínas	25,4
8.- Energía Total(Kcal / 100 g de muestra original)	44,2
9.- Carbohidratos(g / 100 g de muestra original)	6,9
10.- Proteína(g / 100 g de muestra original) (Factor: 6,25)	2,8

**MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO :**

- 1.- AOAC 925.10 Cap. 32, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 2.- AOAC 922.06 Cap. 32, Pág. 5, 21st Edition 2019
- 3.- AOAC 930.05 Cap. 3, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 4.- NTP 205.003:1980 (Revisada el 2011)<sup>1</sup>
- 5.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 6.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 7.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 8.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 9.- Por Diferencia MS-INN Collazos 1993
- 10.- AOAC 920.152 Cap. 37, Pág. 10, 21st Edition 2019

**FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS:** Del 13/10/2023 Al 23/10/2023.

CONTINÚA INFORME DE ENSAYOS N° 004027 - 2023

Pág 1/2

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú

Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322

E-mail: [lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe](mailto:lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe) - Página Web: [www.lamolina.edu.pe/calidadtotal](http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal)

la molina calidad total



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA



**LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS  
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

*Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos*



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

**INFORME DE ENSAYOS  
N° 004027 - 2023**

**ADVERTENCIA :**

- 1 - El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
- 2 - Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
- 3 - Válido sólo para la cantidad recibida. No es un Certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 23 de Octubre de 2023



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - UNALM

Biol. Lic. Lea Margarita Barco Saldaña  
Directora Técnica (e)  
CBP - N° 01232



# LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



## INFORME DE ENSAYOS

N° 004026 - 2023

**SOLICITANTE** : CECILIA PRISCA CCOLLQUESAÑA APAZA  
**DIRECCIÓN LEGAL** : JR.LOS MIRABLES N°1313  
: RUC: 43087505 Teléfono: 987776728  
**PRODUCTO** : SACHACULANTRO  
**NÚMERO DE MUESTRAS** : Uno  
**IDENTIFICACIÓN/MTRA.** : M2  
**CANTIDAD RECIBIDA** : 894,3 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante.  
**MARCA(S)** : S.M.  
**FORMA DE PRESENTACIÓN** : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente.  
**SOLICITUD DE SERVICIO** : S/S N°EN-003113 -2023  
**REFERENCIA** : PERSONAL  
**FECHA DE RECEPCIÓN** : 13/10/2023  
**ENSAYOS SOLICITADOS** : FÍSICO/QUÍMICO  
**PERÍODO DE CUSTODIA** : No aplica

### RESULTADOS :

#### ENSAYOS FÍSICOS/QUÍMICOS :

ALCANCE : N.A.

ENSAYO	RESULTADO
1.- Humedad (g / 100 g de muestra original)	88,0
2.- Grasa (g / 100 g de muestra original)	0,5
3.- Cenizas(g / 100 g de muestra original)	1,8
4.- Fibra Cruda(g / 100 g de muestra original)	1,7
5.- % Kcal. proveniente de Carbohidratos	59,1
6.- % Kcal. proveniente de Grasa	10,4
7.- % Kcal. proveniente de Proteínas	30,5
8.- Energía Total(Kcal / 100 g de muestra original)	43,3
9.- Carbohidratos(g / 100 g de muestra original)	6,4
10.- Proteína(g / 100 g de muestra original) (Factor: 6.25)	3,3

#### MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO :

- 1.- AOAC 925.10 Cap. 32, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 2.- AOAC 922.06 Cap. 32, Pág. 5, 21st Edition 2019
- 3.- AOAC 930.05 Cap. 3, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 4.- NTP 205.003:1980 (Revisada el 2011)
- 5.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 6.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 7.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 8.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 9.- Por Diferencia MS-INN Collazos 1993
- 10.- AOAC 920.152 Cap. 37, Pág. 10, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 13/10/2023 Al 23/10/2023.

CONTINÚA INFORME DE ENSAYOS N° 004026 - 2023

Pág 1/2

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú  
Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322

E-mail: [lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe](mailto:lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe) - Página Web: [www.lamolina.edu.pe/calidadtotal](http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal)

la molina calidad total



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS



**LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS  
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

*Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos*



**INFORME DE ENSAYOS**

**N° 004026 - 2023**

**ADVERTENCIA :**

- 1- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
- 2- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
- 3- Valido sólo para la cantidad recibida. No es un Certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 23 de Octubre de 2023



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - U.N.A.L.M.

*Margarita Barco Saldaña*  
Biol. Lorenza Margarita Barco Saldaña  
Directora Técnica (e)  
CEP - N° 01232

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA



# LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



## INFORME DE ENSAYOS

N° 004025 - 2023

SOLICITANTE : CECILIA PRISCA CCOLLQUESAÑA APAZA  
DIRECCIÓN LEGAL : JR.LOS MIRABLES N°1313  
: RUC: 43087505 Teléfono: 987776728  
PRODUCTO : SÁCHACULANTRO  
NÚMERO DE MUESTRAS : Uno  
IDENTIFICACIÓN/MTRA. : M5  
CANTIDAD RECIBIDA : 614,9 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante.  
MARCA(S) : S.M.  
FORMA DE PRESENTACIÓN : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente.  
SOLICITUD DE SERVICIO : S/S N°EN-003112 -2023  
REFERENCIA : PERSONAL  
FECHA DE RECEPCIÓN : 13/10/2023  
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO/QUÍMICO  
PERÍODO DE CUSTODIA : No aplica

### RESULTADOS :

#### ENSAYOS FÍSICOS/QUÍMICOS :

ALCANCE : N.A.

ENSAYO	RESULTADO
1.- Humedad (g / 100 g de muestra original)	9,5
2.- Grasa (g / 100 g de muestra original)	3,4
3.- Cenizas(g / 100 g de muestra original)	10,6
4.- Fibra Cruda(g / 100 g de muestra original)	10,5
5.- % Kcal. proveniente de Carbohidratos	68,9
6.- % Kcal. proveniente de Grasa	9,1
7.- % Kcal. proveniente de Proteínas	22,0
8.- Energía Total(Kcal / 100 g de muestra original)	336,6
9.- Carbohidratos(g / 100 g de muestra original)	58,0
10.- Proteína(g / 100 g de muestra original) (Factor: 6.25)	18,5

#### MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO :

- 1.- AOAC 925.10 Cap. 32, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 2.- AOAC 922.06 Cap. 32, Pág. 5, 21st Edition 2019
- 3.- AOAC 930.05 Cap. 3, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 4.- NTP 205.003:1980 (Revisada el 2011)
- 5.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 6.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 7.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 8.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 9.- Por Diferencia MS-INN Collazos 1993
- 10.- AOAC 920.152 Cap. 37, Pág. 10, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 13/10/2023 Al 23/10/2023.

CONTINÚA INFORME DE ENSAYOS N° 004025 - 2023

Pág 1/2

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú

Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322

E-mail: [lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe](mailto:lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe) - Página Web: [www.lamolina.edu.pe/calidadtotal](http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal)

 la molina calidad total



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA



**LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

*Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos*



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

**INFORME DE ENSAYOS**  
**N° 004025 - 2023**

**ADVERTENCIA :**

- 1 - El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
- 2 - Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
- 3 - Válido sólo para la cantidad recibida. No es un Certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 23 de Octubre de 2023



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - UNALM

*Lourdes Barco Saldaña*  
Biol. Lourdes Margarita Barco Saldaña  
Directora Técnica (e)  
C.B.P. N° 61232

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú

Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322

E-mail: [lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe](mailto:lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe) - Página Web: [www.lamolina.edu.pe/calidadtotal](http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal)

 la molina calidad total



# LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



## INFORME DE ENSAYOS

N° 004024 - 2023

SOLICITANTE : CECILIA PRISCA CCOLLQUESAÑA APAZA  
DIRECCIÓN LEGAL : JR.LOS MIRABLES N°1313  
RUC: 43087505 Teléfono: 987776728  
PRODUCTO : SACHACULANTRO  
NÚMERO DE MUESTRAS : Uno  
IDENTIFICACIÓN/MTRA. : M4  
CANTIDAD RECIBIDA : 436,8 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante.  
MARCA(S) : S.M.  
FORMA DE PRESENTACIÓN : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente.  
SOLICITUD DE SERVICIO : S/S N°EN-003111 -2023  
REFERENCIA : PERSONAL  
FECHA DE RECEPCIÓN : 13/10/2023  
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO/QUÍMICO  
PERÍODO DE CUSTODIA : No aplica

### RESULTADOS :

#### ENSAYOS FÍSICOS/QUÍMICOS :

ALCANCE : N.A.

ENSAYO	RESULTADO
1.- Humedad (g / 100 g de muestra original)	10,3
2.- Grasa (g / 100 g de muestra original)	2,8
3.- Cenizas(g / 100 g de muestra original)	11,1
4.- Fibra Cruda(g / 100 g de muestra original)	11,3
5.- % Kcal. proveniente de Carbohidratos	68,4
6.- % Kcal. proveniente de Grasa	7,7
7.- % Kcal. proveniente de Proteínas	23,9
8.- Energía Total(Kcal / 100 g de muestra original)	328,4
9.- Carbohidratos(g / 100 g de muestra original)	56,2
10.- Proteína(g / 100 g de muestra original) (Factor: 6.25)	19,6

#### MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO :

- 1.- AOAC 925.10 Cap. 32, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 2.- AOAC 922.06 Cap. 32, Pág. 5, 21st Edition 2019
- 3.- AOAC 930.05 Cap. 3, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 4.- NTP 205.003:1980 (Revisada el 2011)
- 5.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 6.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 7.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 8.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 9.- Por Diferencia MS-INN Collazos 1993
- 10.- AOAC 920.152 Cap. 37, Pág. 10, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 13/10/2023 Al 23/10/2023.

CONTINÚA INFORME DE ENSAYOS N° 004024 - 2023

Pág 1/2

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú

Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322

E-mail: [lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe](mailto:lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe) - Página Web: [www.lamolina.edu.pe/calidadtotal](http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal)

la molina calidad total

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS





**LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

*Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos*



**INFORME DE ENSAYOS**  
**N° 004024 - 2023**

**ADVERTENCIA :**

- 1 - El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
- 2 - Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
- 3 - Valido sólo para la cantidad recibida. No es un Certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 23 de Octubre de 2023



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - UNALM

*Lourdes Barco*

Biol. Lourdes Margarita Barco Saldaña  
Directora Técnica (e)  
CEP - N° 01232

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA