



Artículo original / Original article

Evaluación de las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña (*Bertholletia excelsa*, H.B.K.)

Assessment of adsorption isotherms of chestnut cake flour (*Bertholletia excelsa*, H.B.K.)

David Arocutipa-Coaquira ^{1*}; Christopher Delgado-Solis ¹

¹Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú

Recibido: 15/04/2022

Aceptado: 30/06/2022

Publicado: 25/07/2022

*Autor de correspondencia: cdelgado@unamad.edu.pe

Resumen: Esta investigación tuvo de propósito, la evaluación de las isotermas de adsorción de harina de torta de castaña (*Bertholletia excelsa*, H.B.K.), los gráficos fueron obtenidos a 35°C, 45°C y 55°C respectivamente, usando el método gravimétrico estático, a "aw" de 0.0979 a 0.8880. Los gráficos obtenidos mostraron similitud a las isotermas del tipo II. Para una determinada temperatura, la humedad de equilibrio (X_e) aumentó con el incremento de la actividad de agua, lo que se asemeja a la mayoría de alimentos agrícolas. Los datos obtenidos experimentalmente se ajustaron a "6" modelos matemáticos usuales en isotermas de alimentos (BET, GAB, Halsey, Oswin, Chung-Pfost y Henderson). Los modelos GAB y Oswin son modelos más acertados para representar a las isotermas de adsorción de harina de torta de castaña.

Palabras clave: calor isostérico de adsorción; energía de activación; humedad de equilibrio; método gravimétrico

Abstract: The purpose of this research was to evaluate the adsorption isotherms of chestnut cake flour (*Bertholletia excelsa*, HBK), the graphs were obtained at 35 ° C, 45 ° C and 55 ° C respectively, using the static gravimetric method, at "aw" from 0.0979 to 0.8880. The graphs obtained showed similarity to type II isotherms. For a given temperature, the equilibrium humidity (X_e) increased with increasing water activity, which is similar to most agricultural foods. The data obtained experimentally were fitted to "6" usual mathematical models in food isotherms (BET, GAB, Halsey, Oswin, Chung-Pfost and Henderson). The GAB and Oswin models are more accurate models to represent the adsorption isotherms of chestnut cake flour.

Keywords: activation energy; equilibrium humidity; gravimetric method; isosteric heat of adsorption

1. Introducción

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

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

La importancia de esta investigación se basa para comprender los parámetros ideales para su almacenamiento (humedad relativa y temperatura) y así poder elegir materiales adecuados de empaque, los parámetros de las isotermas son de gran ayuda para determinar la permeabilidad del empaque, también son necesarios para el diseño, modelamiento, optimización de procesos como la aireación, enfriado y almacenamiento de productos alimenticios (Carvalho Lago & Zapata Noreña, 2015; Chirinos-Ochoa et al., 2015; Choque-Quispe et al., 2019; Jimenez Aguirre & Duque De La Cruz, 2018).

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

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

2. Materiales y métodos

2.1. Acondicionamiento de la harina de torta de castaña

La materia prima utilizada en esta investigación fue la castaña de tercera (broken), la cual se obtuvo de la Asociación "ASCART" del centro poblado del triunfo, distrito las Piedras, provincia de Tambopata, región de MDD. Las muestras fueron acondicionadas con distintas soluciones salinas, luego en una incubadora a distintas temperaturas hasta lograr un peso constante.

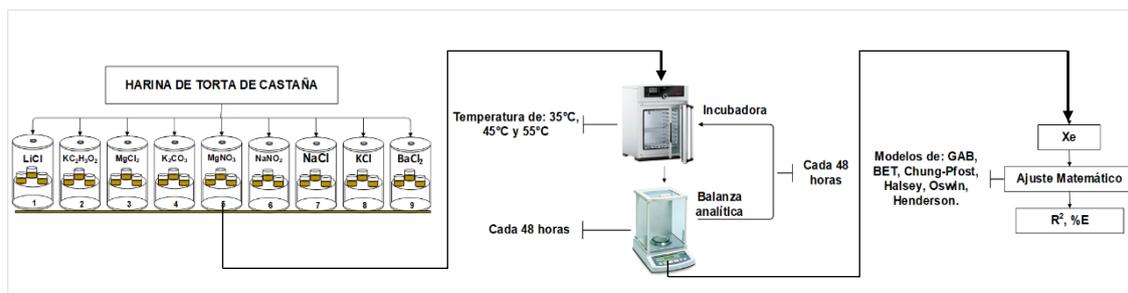


Figura 1. Diagrama de equipos para la evaluación de las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña

2.2. Evaluación de las isotermas de adsorción

Para la evaluación de las isotermas de adsorción se procedió a la preparación de cada solución salina se utilizó la siguiente tabla:

Tabla 1. Cantidad recomendada de sal y agua para preparar solución salina saturada

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

Fuente: (Wolf et al., 1985)

a) Obtención de las humedades relativas

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

Tabla 2. Ecuaciones de las sales utilizadas para la obtención de "aw" a las temperaturas de estudio

N°	Nomenclatura de sales	Fórmula de Sal	Ecuación de regresión (T:°K)	R ²
1	Cloruro de Litio	(LiCl)	$\ln aw = (500,95 \cdot 1/T) - 3,85$	0,976
2	Acetato de Potasio	(K ₂ H ₃ O ₂)	$\ln aw = (861,39 \cdot 1/T) - 4,33$	0,965
3	Cloruro de Magnesio	(MgCl ₂)	$\ln aw = (303,35 \cdot 1/T) - 2,13$	0,995
4	Carbonato de Potasio	(K ₂ CO ₃)	$\ln aw = (145,00 \cdot 1/T) - 1,30$	0,967
5	Nitrato de Magnesio	(MgNO ₃)	$\ln aw = (356,60 \cdot 1/T) - 1,82$	0,987
6	Nitrato de Sodio	(NaNO ₂)	$\ln aw = (435,96 \cdot 1/T) - 1,88$	0,974
7	Cloruro de Sodio	(NaCl)	$\ln aw = (228,92 \cdot 1/T) - 1,04$	0,961
8	Cloruro de Potasio	(KCl)	$\ln aw = (367,58 \cdot 1/T) - 1,39$	0,967
9	Cloruro de bario	(BaCl ₂)	$\ln aw = (58,94 \cdot 1/T) - 0,31$	0,965

Fuente: (Labuza et al., 1985)

Seguidamente se procedió a calcular las humedades relativas utilizando las ecuaciones antes mencionadas, las humedades relativas varían desde 9,79% hasta 88,80% el cual se muestra a continuación:

Tabla 3. Humedades relativas (%) de cada solución salina en base a las temperaturas estudiadas

N°	Nomenclatura de sales	Fórmula de Sal	Humedad Relativa		
			35 °C	45 °C	55 °C
1	Cloruro de Litio	(LiCl)	10,81	10,28	9,79
2	Acetato de Potasio	(K ₂ H ₃ O ₂)	21,55	19,74	18,18
3	Cloruro de Magnesio	(MgCl ₂)	31,80	30,84	29,95
4	Carbonato de Potasio	(K ₂ CO ₃)	43,63	42,99	42,40
5	Nitrato de Magnesio	(MgNO ₃)	51,54	49,70	48,03
6	Nitrato de Sodio	(NaNO ₂)	62,80	60,07	57,61
7	Cloruro de Sodio	(NaCl)	74,30	72,58	71,01
8	Cloruro de Potasio	(KCl)	82,11	79,09	76,35
9	Cloruro de bario	(BaCl ₂)	88,80	88,27	87,78

Fuente: (Labuza et al., 1985)

b) Obtención de "Xe" humedad de equilibrio

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

$$Xe = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (1)$$

Donde:

Xe : Contenido de humedad en equilibrio (gr H₂O/gr masa seca).

Meq : cantidad de muestra en equilibrio (gr).

Ms : cantidad de muestra seca (gr).

2.2.1. Modelado matemático

Para el modelamiento matemático se utilizó 6 modelos:

a. Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y De Bóer) $Xe = \frac{Xm \cdot C \cdot K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C \cdot K a_w)}$ (2)

b. Modelo BET de Brunauer, Emmet y Teller $Xe = \frac{Xm \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + a_w \cdot (C - 1))}$ (3)

c. Modelo de Halsey $a_w = \exp\left[\frac{-A}{Xe^B}\right]$ (4)

d. Modelo de Oswin $Xe = A \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)}\right]^B$ (5)

e. Modelo de Henderson $a_w = 1 - \exp(-k \cdot Xe^n)$ (6)

f. Modelo de Chung-Pfost $a_w = e^{\left(\frac{A}{RT}\right) \cdot e^{(-B \cdot Xe)}}$ (7)

c) Obtención de "Xm" humedad de monocapa

La humedad de monocapa se obtuvo a partir de las ecuaciones del modelo matemático de Gab.

Obtención de "qst" calor isostérico de adsorción

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

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} \Big|_X = -\frac{q_{st}}{R} \cdot \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] \quad (8)$$

Dónde:

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

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

Qst = Calor isostérico neto de sorción (KJ/mol).

R = Constante universal de los gases 8,314 KJ/ (Kmol °K).

El valor de qst tiene relación con las rectas graficadas de ln de aw versus el inverso de las temperaturas, finalmente los datos de qst y las humedades de equilibrio se ajustó a la ecuación exponencial de (Tsami et al., 2007).

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

Dónde:

q_0 = Calor isostérico de adsorción de la primera molécula de H₂O en kJ/mol.

X_e = Humedad de equilibrio en gr H₂O/gr masa seca.

X_0 = humedad inicial en gr H₂O/gr masa seca.

2.2.2. Obtención de “Ea” energía de activación

Para la obtención de la energía de activación se utilizó la fórmula de Arrhenius (Ecuación 10), seguidamente se trazó las curvas de logaritmo natural de la monocapa X_m , la constante C de GAB y el parámetro K de GAB, todos estos parámetros fueron graficados con el inverso de las temperaturas en grados kelvin °K, obteniéndose así la pendiente $-E_a/R$, finalmente se determinó el coeficiente de determinación R^2 para ver si presentan buena relación.

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

Donde:

D: constante estudiada.

D₀: parámetro de Arrhenius.

E_a: energía de activación en kJ/ k mol

R: constante universal de los gases.

°T: temperatura absoluta (°K).

2.2.3. Tratamiento de datos

2.2.3.1. Técnica de determinación de datos

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

Asimismo, para el análisis de regresión no lineal se utilizó el software STATISTICA 2020 versión 10,0 y así evaluar las constantes del modelo matemático, con 500 interacciones y 0,0001 criterios de convergencia, los ajustes se realizaron al nivel de significancia del 5%. El ajuste de los modelos matemáticos fue evaluado mediante el coeficiente de determinación (R^2), también se utilizó “%E” (porcentaje de error medio relativo).

$$\%E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \quad (11)$$

Donde:

%E : error relativo medio en porcentaje.

X_{ei} : Humedad del equilibrio experimental (gr H₂O / gr ms).

X_{ci} : humedades de equilibrio ajustado por modelo (gr H₂O / gr ms.).

n : cantidad de observaciones.

3. Resultados y Discusiones

3.1. Isothermas de Adsorción

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

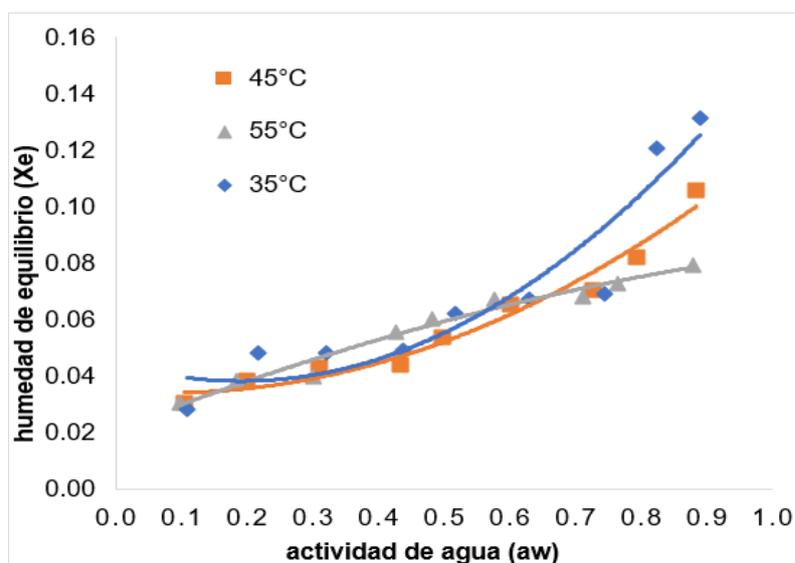


Figura 2. Isotermas de adsorción de harina de torta de castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) a 35°C, 45°C y 55°C.

Los modelos que muestran el mejor ajuste son: GAB y Oswin, los cuales se muestran en las Ecuaciones 2 y 5. También se puede decir que las curvas tienen un comportamiento Tipo II, y tienen la forma de una "curva s", según la Isoterma de Van der Waals a 35 °C, 45°C y 55°C de clasificación de temperatura, la interacción adsorbente-adsorbente es débil. Este comportamiento de esta isoterma es una característica típica de los alimentos con alto contenido proteico.

Las isotermas presentan curvas similares a una recta hasta el punto en donde la aw es de 0,6 es ahí donde las curvas presentan entrecruzamientos y cambian su rumbo de forma exponencial. Esto indica que la condición óptima para el almacenamiento es a humedades inferiores al 6,67% de humedad del producto y humedad relativa del ambiente inferior al 60%, si en caso la humedad relativa del ambiente y del producto sea superior sea superior a lo indicado el producto podría ser afectado tanto en su calidad y microbiológicamente. Comportamientos similares fueron obtenidos por:

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

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

Se utilizaron seis modelos matemáticos de las isotermas más comúnmente utilizadas en los alimentos para el modelamiento de las isotermas de adsorción. Además, se utilizó la versión 10.0 del software STATISTICA 2020. Los parámetros se obtuvieron por regresión no lineal de los datos obtenidos experimentalmente, con un R2 y %E.

Tabla 4. Parámetros obtenidos a distintos modelos matemáticos a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C

Modelo	T (°C)	Parámetros						R2	%E	Promedio	
		Xm	C	K	N	A	B			R2	%E
GAB	35	0,0539	227,2266	0,853	-	-	-	0,9262	11,2648	0,9571	6,8695
	45	0,0325	105,6159	0,780	-	-	-	0,9848	4,6077		
	55	0,0324	23,2355	0,425	-	-	-	0,9603	4,7360		
Chung	35	-	-	-	-	11,8565	39,5871	0,9043	15,7293	0,9385	13,0130

Modelo	T (°C)	Parámetros						R ²	%E	Promedio	
		X _m	C	K	N	A	B			R ²	%E
Pfst	45	-	-	-	-	-11,6551	42,5649	0,9705	11,8365		
	55	-	-	-	-	-16,0438	46,8264	0,9408	11,4733		
Halsey	35	-	-	-	-	0,00094	2,3231	0,9214	21,3099	0,9369	15,7315
	45	-	-	-	-	0,00085	2,2783	0,9789	9,0892		
	55	-	-	-	-	0,00073	2,3674	0,9103	16,7953		
Oswin	35	-	-	-	-	0,0599	0,3761	0,9138	10,8523	0,9368	8,0127
	45	-	-	-	-	0,0548	0,3133	0,9814	5,2314		
	55	-	-	-	-	0,0560	0,2113	0,9153	7,9544		
Bet	35	0,1370	0,8348	-	-	-	-	0,7766	6,9630	0,8423	6,2023
	45	0,0993	1,5190	-	-	-	-	0,8221	5,9340		
	55	0,0783	3,8241	-	-	-	-	0,9283	5,7100		
Henderson	35	-	-	180,986	1,9824	-	-	0,8826	19,9822	0,9333	15,0479
	45	-	-	427,584	2,2285	-	-	0,9599	15,7435		
	55	-	-	2819,215	2,9246	-	-	0,9573	9,4181		

La interpretación de los parámetros obtenidos en la tabla 10 indica que, GAB y Oswin son los modelos apropiados que presentaron ajustes superiores en las isotermas de adsorción de la harina de torta de castaña.

El promedio de R² del modelo de GAB fue de 0,9571 y el promedio del error relativo porcentual de 6,8695%, la temperatura que se ajusta mejor al modelo es de 45°C, ya que presenta un R² de 0,9848 y error relativo porcentual de 4,6077%.

El modelo de Oswin también se ajusta a los datos experimentales, presentando promedios de R² de 0,9368 y para el error relativo porcentual de 8,0127%, la temperatura que se ajusta mejor al modelo es de 45°C, ya que presenta un R² de 0,9814 y error relativo porcentual de 5,2314%.

3.1.1. Ajuste de modelos matemáticos

Ajuste para el modelo GAB

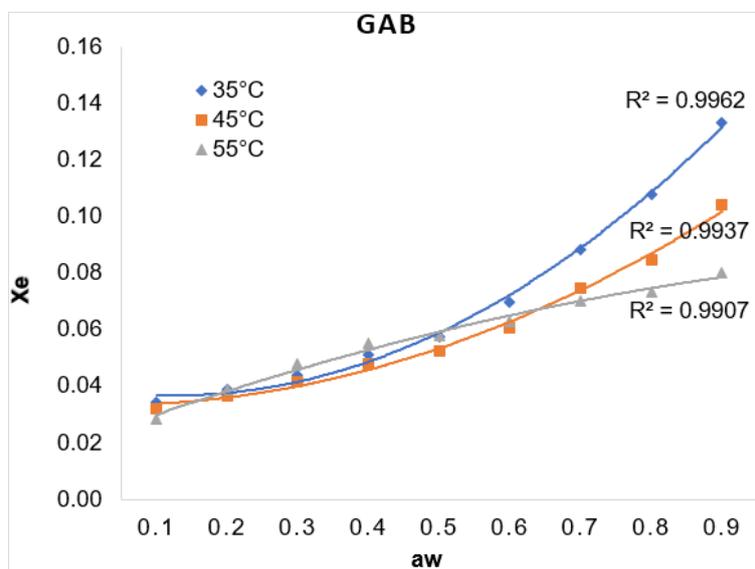


Figura 3. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de GAB para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C

Representa el ajuste de los datos obtenidos en la parte experimental a distintas temperaturas evaluadas por GAB, las curvas ajustadas a este modelo presentan similitud a las curvas experimentales obtenidas, el promedio del coeficiente de determinación (R²) = 0,9571 este valor

indica que existe buena relación del modelo en las isotermas experimentales ya que está cercano a la unidad, y el promedio del porcentaje de error medio relativo (%E) = 6,8695%, mientras este valor sea próximo a cero es favorable para representar las isotermas experimentales.

El grafico se asemeja a la isoterma de tipo II esto ocurre cuando la interacción adsorbato-adsorbente es baja. Este modelo indica que la harina de torta de castaña adsorbe muy poca humedad en los locales de almacenamiento. (Huaman Yuca, 2016) también menciona que GAB tiene un ajuste superior para la harina de castaña.

El ajuste de los datos de este modelo coincide con los datos experimentales y por lo tanto es el modelo indicado para representar a las curvas experimentales de la harina de torta de castaña.

Ajuste para el modelo OSWIN

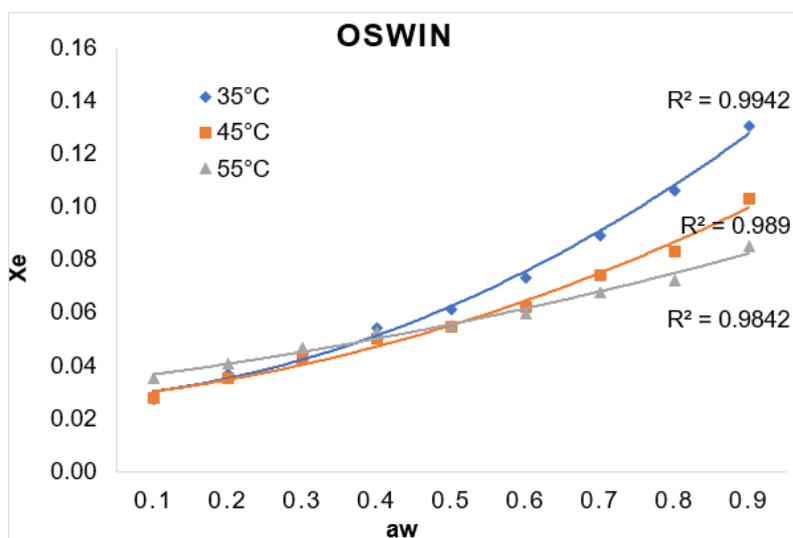


Figura 4. Isoterma de adsorción ajustada al modelo de OSWIN para harina de torta de castaña a 35°C, 45°C y 55°C

Representa el ajuste de los datos obtenidos en la parte experimental a distintas temperaturas evaluadas por OSWIN, las curvas ajustadas a este modelo presentan similitud a las curvas experimentales obtenidas.

El promedio del coeficiente de determinación (R^2) = 0,9368, este valor indica que existe buena relación del modelo en las isotermas experimentales, ya que está cercano a la unidad. El promedio del porcentaje de error medio relativo (%E) = 8,0127%, mientras este valor sea próximo a cero es favorable para representar las isotermas experimentales, por lo tanto, es favorable para la representación de las curvas experimentales. El grafico se asemeja a la isoterma de tipo II esto ocurre cuando la interacción adsorbato-adsorbente es baja.

Este modelo indica que la harina de torta de castaña adsorbe muy poca humedad en los locales de almacenamiento. Huaman Yuca (2016) también menciona que los resultados de GAB obtuvieron un ajuste superior para la harina de castaña. Por lo tanto, es el modelo indicado para representar las curvas experimentales de la harina de torta de castaña.

3.2. Evaluación de los parámetros obtenidos

3.3.1. Evaluación del parámetro "Xm" de GAB

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

Tabla 1. Datos de las temperaturas y las humedades de monocapa X_m obtenidos a partir del modelo de GAB

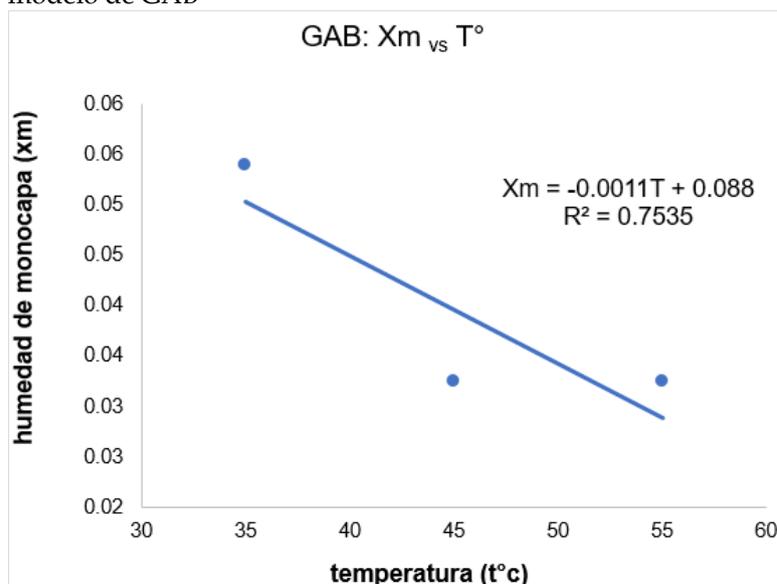


Figura 5. Gráfico de las temperaturas y las humedades de monocapa X_m obtenidos a partir del modelo de GAB

Las humedades de monocapa (X_m) para el modelo de GAB decreció con el incremento de temperatura, desde 0,0539 hasta 0,0324 (g agua/g masa seca), comportamientos similares se ha presentado en distintos alimentos tal como lo indica; (Gálvez et al., 2006) para harina de maíz, (Tonon, 2009) para jugo de huasai, (Oliveira et al., 2009) para micro algas, y (Ccalli Pacco, 2003) para higo seco.

Se puede afirmar que la humedad de monocapa (X_m) depende de la temperatura. Por lo tanto, al analizar los valores de X_m por regresión lineal, se tiene la siguiente ecuación $X_m = -0,0011T + 0.088$ que expresa R^2 de 0,7535, lo que significa que presenta una relación adecuada, en cuanto a la ecuación de la humedad de monocapa se afirma que la pendiente es negativa y la humedad de monocapa es dependiente a la temperatura, ya que conforme se incrementa la temperatura disminuye la humedad de monocapa (Choque Q. et al., 2009).

3.3. Calor Isostérico de Adsorción (q_{st})

La Figura 6 muestra una representación lineal de $-\ln(a_w)$ comparado con $1/T$ de la ecuación de Clausius -Clapeyron para valores de humedades de equilibrio (X_e).

Debido a la inclinación de cada línea, el calor isostérico de adsorción ha sido determinado. Los valores de R^2 para estas líneas son superiores a 0,999, lo que es apropiado.

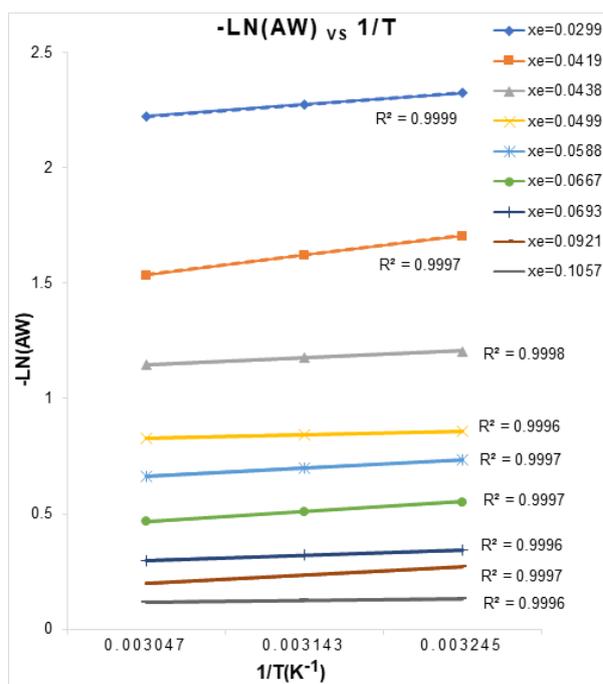


Figura 6. Gráfico de $-\ln(a_w)$ versus $1/T$ para calcular el q_{st} de harina de torta de castaña para distintas humedades de equilibrio (X_e)

La actividad de agua (a_w) aumentó con el incremento de la temperatura, entonces se podría decir que la temperatura (T°) influye con la actividad de agua (a_w). Similares tendencias fueron obtenidas por Sahu et al. (2021) en su investigación "Comportamiento de sorción y calor isostérico de productos extruidos enriquecidos con proteínas a base de maíz y mijo", (Toshkov et al., 2020) en su investigación "Termodinámica de la absorción de humedad en semillas de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.)" y Barati, Zare y Zomorodian (2016) en su investigación "Isothermas de absorción de humedad y propiedades termodinámicas de la semilla de cártamo utilizando modelos empíricos y de redes neuronales."

3.3.1. Efecto de X_e en q_{st} aplicando la ecuación de TSAMI

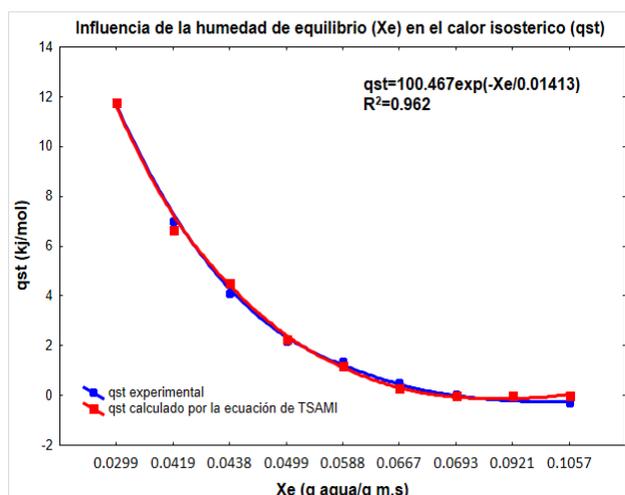


Figura 7. Efecto de X_e en q_{st} para harina de torta de castaña

En la Figura 7, el valor del calor isostérico de adsorción (q_{st}) se grafica en función de X_e . El q_{st} ha disminuido de 11,7631 a 0,2819 kJ/mol, y X_e pasó desde 0,0299 hasta 0,1057 gr H_2O /gr m.s.,

la disminución de q_{st} y el aumento de X_e representa que a medida que los sitios disponibles más activos de la superficie del alimento son ocupados, tiende a disminuir el calor isostérico, y así menos sitios activos existen la humedad va aumentando y el q_{st} va disminuyendo, incluso hasta se presentan valores negativos de q_{st} lo que significa que hay mayor cantidad de agua ligada (Pulla Huillca, 2011). Asimismo, el q_{st} experimental tiene relación con el q_{st} calculado, aplicando la ecuación de TSAMI se encontró 100,467 kJ/mol y 0,014 (g agua/g m.s), con un valor R^2 de 0,962. Cheng et al. (2020), evaluaron el calor isostérico de adsorción en su investigación "Adsorción de humedad en pericarpios de abrojo (*Trapa bispinosa* Roxb.): Propiedades termodinámicas y transición vítrea" los valores q_{st} y X_e para los datos de adsorción de agua aplicando la ecuación de TSAMI se encontraron 154,66 kJ/mol y 0,0373 (gr H_2O /gr m.s), con un valor R^2 bastante alto de 0,970. (Aksil et al., 2019), en su investigación puede verse claramente que el Q_{st} disminuye rápidamente al aumentar el contenido de humedad de equilibrio, de 52,337 a 6,771 KJ/mol a humedades de 0,15 a 0,4 (gr H_2O /gr m.s).

Tabla 5. Valores de q_0 , X_0 y R^2 ajustados a la ecuación de TSAMI

Muestra	q_0	X_0	R^2
Harina de torta de castaña	100,46741	0,01413	0,96218

Nota: Se obtuvo al 95% de confiabilidad

Al construir la ecuación exponencial de TSAMI, se presenta un coeficiente de determinación 0,962 basado en este valor se puede decir que el modelo predice correctamente el valor del calor isostérico del producto estudiado en función de X_e (humedad en equilibrio).

3.4. Energía de activación (E_a)

Para ver si la temperatura depende de los parámetros del modelo GAB (X_m , CGAB y KGAB) se evaluó por medio de la ecuación de Arrhenius. La energía de activación se determinó aplicando la ecuación 10 y trazando así el parámetro de isoterma GAB $\ln(D)$ frente a $1/T$.

3.4.1. Obtención de E_a del parámetro " X_m " de GAB

Tabla 6. Datos de $\ln(X_m)$ (humedad de monocapa) versus $1/T$ (el inverso de las temperaturas)

$T^\circ C$	X_m	$1/T(K^{-1})$	$\ln(X_m)$
35	0,0324	0,00325	-3,42960
45	0,0325	0,00314	-3,42652
55	0,0539	0,00305	-2,92062
R: constante universal de los gases		(-)E_a/R	E_a
0,008314		-2545,9	21,17 kJ/mol

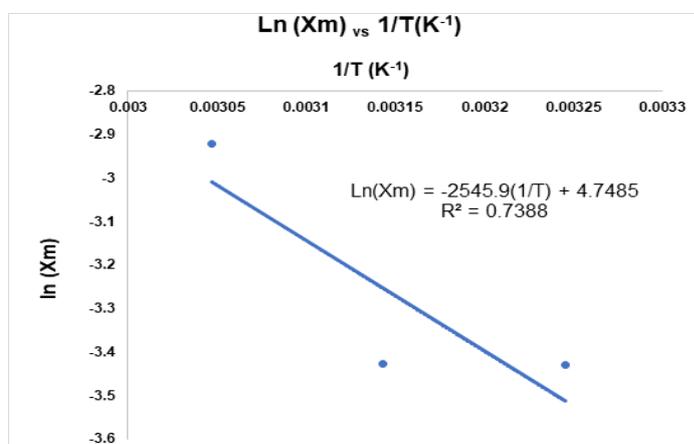


Figura 8. Gráfico de la influencia de $\ln(X_m)$ versus $1/T$ (K^{-1})

En el gráfico se puede apreciar tendencia negativa para la influencia de $\ln(X_m)$ versus $1/T$ (K-1), y R^2 de 0,7388, lo que indica que a medida que $\ln(X_m)$ disminuye, va incrementando $1/T$. La energía necesaria para que el agua se adhiera hacia la parte superficial del producto y así pueda formarse una monocapa (X_m) es de 21,167 kJ/mol a 35°C, 45°C y 55°C. Es posible que esta cantidad de energía de activación sea debido a las proteínas existentes en la harina de torta de castaña y que posee grandes cantidades de grupos activos que adsorben humedad. (Huaman Yuca, 2016) en su tesis de Isotermas de Adsorción de Harina de Castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K) obtuvo energía de activación de 12,0163 kJ/mol, para el parámetro X_m , para un intervalo de temperatura de 30°C a 50°C, este resultado es similar a la E_a obtenido en la presente investigación.

3.4.2. Obtención de E_a de del parámetro "C" de GAB

Tabla 7. Datos de $\ln(C)$ (parámetro "C") versus $1/T(K-1)$ (el inverso de las temperaturas)

T °C	C	1/T(K-1)	Ln(C)
35	227,2266	0,00325	5,42595
45	105,6159	0,00314	4,65981
55	23,2355	0,00305	3,14568
R: constante universal de los gases		(-) E_a/R	E_a
0.008314		11486	95,50kJ/mol

En la figura 9, se observa que el parámetro CGAB, depende de la temperatura, realizando el análisis de los valores de $\ln(C)$ se linealiza con la ecuación de $\ln(C) = 11486(1/T) - 31,714$ con un R^2 de 0,9584, lo que significa que existe buena relación, en cuanto a la ecuación de $\ln(C)$ se afirma que la pendiente es positiva y el $\ln(C)$ es dependiente del inverso de la temperatura ($1/T$), ya que conforme se incrementa el $\ln(C)$ aumenta ($1/T$). También el parámetro "C" muestra relación con la energía de la humedad adsorbida a la monocapa y la entalpia que es el calor adsorbido por la harina de torta de castaña, esto va de la mano con la energía de activación que obtuvo el valor de 95,495 kJ/mol este valor es mayor a 1, lo que indica que se trata de un producto altamente higroscópico. En su tesis (Huaman Yuca, 2016) obtuvo energía de activación de 36,634 kJ/mol, para el parámetro CGAB, para un intervalo de temperatura de 30°C a 50°C, este resultado es similar a la E_a obtenido en la presente investigación.

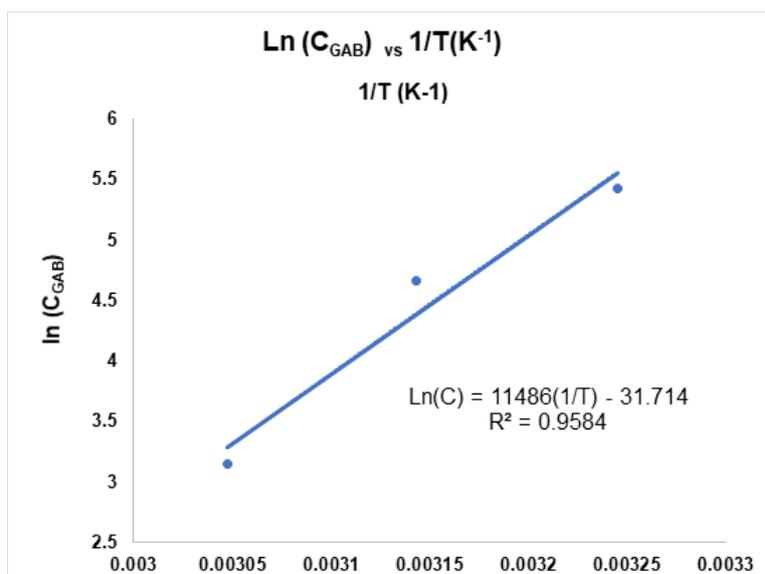


Figura 9. Gráfico de la influencia de $\ln(C)$ versus $1/T$ (K-1)

3.4.3. Obtención de E_a de del parámetro "K" de GAB

En la Tabla 8 de la presente investigación se observa que los valores de K fueron inferiores a la unidad, lo que muestra que existieron interacciones energéticas entre las moléculas de agua de la multicapa con la superficie del alimento.

Tabla 8. Datos de Ln (K) (parámetro “K”) versus 1/T(K-1) (el inverso de las temperaturas)

T°C	K	1/T(K-1)	ln(K)
35	0,8530	0,00325	-0,15900
45	0,7796	0,00314	-0,24897
55	0,4249	0,00305	-0,85590
R: constante universal de los gases		(-) Ea/R	Ea
0,008314		3495	29,06kJ/mol

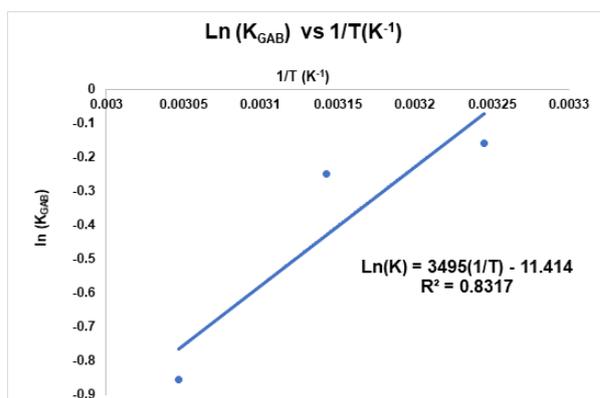


Figura 10. Gráfico de la influencia de Ln (K) versus 1/T (K-1)

El parámetro K del modelo de GAB brinda medidas para interacciones de las moléculas de agua de la multicapa con el adsorbente, su valor está en la energía de las moléculas de la monocapa y el agua líquida, realizando el análisis de los valores de ln(K) se linealiza con la ecuación de $\text{Ln}(K) = 3495(1/T) - 11,414$ con un R^2 de 0,8317, concluyendo que existe buena relación, en cuanto a la ecuación de Ln(K) se afirma que la pendiente es positiva y el Ln(K) es dependiente del inverso de la temperatura (1/T), ya que conforme se incrementa el Ln(K) aumenta (1/T).

Pascual-Pineda et al. (2017), indican que los valores de K para los tres productos que investigaron: polvo de sacarosa y calcio secado por aspersión, polvo de piña secado en lecho vibro fluidizado y capsulas de alginato y zeolita con oleoresina de paprika, estuvieron en el intervalo de 0,876 a 1,057, además indica, cuando K=1 las moléculas de agua en la multicapa se comportan como agua pura, las cuales no tienen interacción alguna con la superficie.

Huaman Yuca (2016) en su tesis de Isotermas de Adsorción de Harina de Castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K) obtuvo energía de activación de -5,6722 kJ/mol, para el parámetro KGAB, para un intervalo de temperatura de 30°C a 50°C, este resultado es similar a la Ea obtenido en la presente investigación.

4. Conclusiones

Las isotermas presentaron comportamiento del tipo II para las temperaturas estudiadas, tiene una curva de característica “S”. Este comportamiento es clásico en alimentos con elevado contenido de proteínas.

El decrecimiento del contenido de agua de equilibrio con el aumento de temperatura está relacionado con el cambio de energía del sistema, lo cual sugiere que el crecimiento de temperatura disminuye la estabilidad termodinámica de las moléculas de agua, que es de similar comportamiento a la mayor parte de los productos agrícolas.

Los modelos que presentaron buen ajuste fueron GAB y Oswin, la temperatura que se acomoda mejor al modelo es de 45°C, el R2 de 0,9848 y error relativo porcentual de 4,6077%. El modelo Oswin también se ajusta a los datos obtenidos en la parte experimental, la temperatura que se acomoda mejor al modelo es de 45°C.

Las condiciones adecuadas de humedad y temperatura para almacenar el producto son, a humedades inferiores a 6,67% y a HR del ambiente inferiores al 60%, para 35°C, 45°C y 55°C. Si la HR del ambiente es superior al 60% y humedad es superior al 6,67%, podría ser afectada la calidad de la harina de torta de castaña.

La humedad de monocapa de GAB es dependiente a la temperatura, reduciendo desde (0,0539-0,0324) gr H₂O/gr m.s. para 55°C, 45°C y 35°C. El valor de "K" del modelo de GAB, depende de la temperatura reduciendo de 0,8530 a 0,4249 estos valores son inferiores a la unidad, lo que muestra que existieron interacciones energéticas entre las moléculas de agua de la multicapa con la superficie del alimento. El valor de "C" del modelo de GAB es superior a 1, indica que la harina de torta de castaña es altamente higroscópica, por ello, puede sufrir deterioro y ser atacado por microbios.

Los valores del qst reducen conforme va aumentando la humedad de equilibrio, desde 11.7631 hasta -0,2819 kJ/mol a humedades de 0,0299 hasta 0,1057 gr H₂O/gr masa seca. Para calcular el calor isostérico de adsorción, se verificó la validez de la ecuación planteada por (Tsami et al., 2007), obteniéndose un buen ajuste del R2= 0,96218.

Existe efecto en la temperatura para el modelo de GAB, esto se determinó con la "Ea", resultando valores de 21,167 kJ/mol para "Xm", 95,495 kJ/mol para "C" y 29,057 kJ/mol para "K", observando evidentemente el efecto de la temperatura en la humedad de monocapa con tendencia negativa, "C" y "K" con tendencias positivas.

Financiamiento

Artículo financiado por la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, con Resolución de Vicerrectorado de Investigación N° 261-2019-UNAMAD-VRI.

Referencias bibliográficas

- Aksil, T., Abbas, M., Trari, M., & Benamara, S. (2019). Water adsorption on lyophilized *Arbutus unedo* L. fruit powder: Determination of thermodynamic parameters. *Microchemical Journal*, 145, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.10.012>
- Barati, M., Zare, D., & Zomorodian, A. (2016). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of safflower seed using empirical and neural network models. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(2), 236–246. <https://doi.org/10.1007/s11694-015-9298-4>
- Carvalho Lago, C., & Zapata Noreña, C. P. (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>
- Ccalli Pacco, H. (2003). *Secagem de figo (Ficus Carica L.) da variedade "Gigante de Valinhos" em secador de bandejas* [Universidad Estadual de Campinas]. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/256429>
- Cheng, X., Zhang, M., & Adhikari, B. (2020). Moisture adsorption in water caltrop (*Trapa bispinosa* Roxb.) pericarps: Thermodynamic properties and glass transition. *Journal of Food Process Engineering*, 43(8), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13442>

- Chirinos-Ochoa, N., Díaz-Viteri, J., & Mego-Mego, V. (2015). *Efecto de dietas extruidas en base a torta de castaña y fruto de macambo, sobre los índices de crecimiento y zootécnicos en el cultivo de pacos juveniles* [Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios].
<https://revistas.unamad.edu.pe/index.php/ariva/article/download/176/222?inline=1>
- Choque-Quispe, D., Ligarda-Samanez, C. A., Ramos-Pacheco, B. S., Taípe-Pardo, F., Peralta-Guevara, D. E., & Solano Reynoso, A. M. (2019). Evaluación de las isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Revista ION*, 31(2), 67–81.
<https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018005>
- Choque Q., D., Cáceres H., N. B., & Solano R., A. M. (2009). *Evaluación de las isotermas de adsorción del maíz morado (Zea mays L.): Calor Isostérico y Energía de Activación*. Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC. <https://doi.org/9783659704000>
- 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>
- Huaman Yuca, B. Y. (2016). *Isotermas de adsorción de la harina de castaña (Bertholletia excelsa H.B.K) en la región de Madre de Dios* [Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios].
<http://hdl.handle.net/20.500.14070/326>
- Jimenez Aguirre, N. A., & Duque De La Cruz, C. E. (2018). “Efecto de la sustitución parcial de la harina de trigo (*Triticum aestivum l.*) por harina de castaña (*Bertholletia excelsa*) en el comportamiento reológico de su masa para la aplicación en la industria de la panificación” [Universidad Nacional del Santa]. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/3172>
- Labuza, T., Kaanane, A., & Chen, J. (1985). Efecto de la temperatura sobre las isotermas de absorción de humedad y el cambio en la actividad del agua de dos alimentos deshidratados. *Revista de Ciencia Alimentaria*, 50, 385–392.
<https://experts.umn.edu/en/publications/effect-of-temperature-on-the-moisture-sorption-isotherms-and-wate>
- Oliveira, E. G., Rosa, G. S., Moraes, M. A., & Pinto, L. A. A. (2009). Moisture sorption characteristics of microalgae *Spirulina platensis*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(1), 189–197. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322009000100018>
- Pascual-Pineda, L. A., Alamilla-Beltrán, L., Gutiérrez-López, G. F., Azuara, E., & Flores-Andrade, E. (2017). Predicción de condiciones de almacenamiento de alimentos deshidratados a partir de una isoterma de adsorción de vapor de agua. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), 207–220. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62049878020.pdf>
- Pulla Huillca, P. V. (2011). *Determinación de las isotermas de adsorción del ají (Caspicum annum) seco* [Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios].
<http://repositorio.unamad.edu.pe/bitstream/handle/UNAMAD/61/004-2-1-009.pdf?sequence=1>
- Sahu, C., Patel, S., & Khokhar, D. (2021). Sorption behavior and isosteric heat of maize-millet based protein enriched extruded product. *Heliyon*, 7(4), e06742.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06742>

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

<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/255160>

Toshkov, N., Lazarov, L., Popova, V., Ivanova, T., & Menkov, N. (2020). Thermodynamics of moisture sorption in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seeds. *E3S Web of Conferences*, 207.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020701019>

Tsami, E., Marquilis, Z. B., Marinos-Kouris, D., & Saravacos, G. D. (2007). 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>

Wolf, W., Spiess, W. E. L., & Jung, G. (1985). Standardization of Isotherm Measurements (Cost-Project 90 and 90 BIS). In *Properties of Water in Foods* (pp. 661–679). Springer Netherlands.

https://doi.org/10.1007/978-94-009-5103-7_40