



¹Universidad Nacional de Trujillo. Huamachuco, Perú. rvegas@unitru.edu.pe, lmazeliano@unitru.edu.pe.

²Cooperativa Agraria Ecológica Markahuamachuco. Huamachuco, Perú. gte.ecomarka@gmail.com.

³Procompite, Municipalidad Provincial Sánchez Carrión. Huamachuco, Perú. garciafred880@gmail.com.

*Autor para correspondencia: rvegas@unitru.edu.pe.

Recibido: 17/04/2024. Última revisión: 07/05/2025. Aceptado: 01/09/2025.

Propiedades de adsorción de humedad y características termodinámicas de harina de tocosh de papa hidrolizada y harina de jengibre

Resumen

En esta investigación se compararon las propiedades de adsorción de humedad (modelo GAB) y las características termodinámicas —calor isotérico (Q_{st}), entropía (ΔS), energía libre de Gibbs (ΔG), área de adsorción (A_s) y energía de activación (E_a)— de harinas de tocosh de papa, *in natura* (HTs), hidrolizada enzimáticamente (HTe) e hidrolizada por vía ácida (HTa), y de harina de jengibre (HJe). Se evaluó la influencia de los compuestos bioactivos (carbohidratos, fenoles y gingeroles) sobre el comportamiento higroscópico y la estabilidad de los materiales. La HTa presentó la mayor humedad de monocapa ($X_0 = 0,1105 - 0,0982 \text{ g H}_2\text{O/g s.s.}$), la cual disminuyó con la temperatura. La HJe exhibió los parámetros GAB (C y K) y el Q_{st} más altos ($55,9-54,77 \text{ kJ/kmol}$), además de una ΔS de $29,695 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$. Los valores negativos de ΔG indicaron adsorción espontánea. El A_s fue mayor en la HTa ($390,14 \text{ m}^2/\text{g}$ a 20°C), mientras que su E_a fue la más baja ($4,52 \text{ kJ/mol}$); esto refleja una adsorción rápida. Se recomienda secar las harinas hasta X_0 y emplear envases impermeables, especialmente para HTa, debido a su alta área expuesta. Los resultados aportan bases científicas para optimizar el procesamiento, almacenamiento y aplicación industrial de estas harinas en productos alimentarios y farmacéuticos con potencial nutracéutico.

Palabras clave: propiedades termodinámicas; hidrólisis enzimática-ácida; modelo GAB

Moisture Adsorption and Thermodynamic Properties of Hydrolyzed Potato Tocosh and Ginger Flours

Abstract

In this study, the moisture adsorption properties (GAB model) and thermodynamic characteristics —isosteric heat (Q_{st}), entropy (ΔS), Gibbs free energy (ΔG), adsorption area (A_s), and activation energy (E_a)— of potato tocosh flours, *in natura* (HTs), enzymatically hydrolyzed (HTe), and acid hydrolyzed (HTa), and of ginger flour (HJe) were compared. The influence of bioactive compounds (carbohydrates, phenols, and gingerols) on the hygroscopic behavior and stability of the materials was evaluated. HTa showed the highest monolayer moisture ($X_0 = 0.1105 - 0.0982 \text{ g H}_2\text{O/g d.s.}$), which decreased with temperature. HJe exhibited the highest GAB parameters (C and K) and Q_{st} ($55.9-54.77 \text{ kJ/kmol}$), and a ΔS of $29.695 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$. Negative ΔG values indicated spontaneous adsorption. A_s was highest for HTa ($390.14 \text{ m}^2/\text{g}$ at 20°C), while its E_a was the lowest (4.52 kJ/mol), reflecting rapid adsorption. Drying flours to X_0 and using impermeable containers are recommended, especially for HTa, due to their high exposed area. The results provide a scientific basis for optimizing the processing, storage, and industrial application of these flours in food and pharmaceutical products with nutraceutical potential.

Keywords: Thermodynamic properties; Enzymatic acid hydrolysis; GAB model.

Propriedades de adsorção de umidade e características termodinâmicas de farinha de tocosh hidrolizada de batata e farinha de gengibre

Resumo

Neste estudo, foram estudadas as propriedades de adsorção de umidade (modelo GAB) e as características termodinâmicas —calor isotérico (Q_{st}), entropia (ΔS), energia livre de Gibbs (ΔG), área de adsorção (A_s) e energia de ativação (E_a)— das farinhas de batata tocosh, *in natura* (HTs), hidrolizadas enzimaticamente (HTe) e hidrolizadas com ácido (HTa), e da farinha de gengibre (HJe). Foi avaliada a influência dos compostos bioativos (hidratos de carbono, fenóis e gingeróis) no comportamento higroscópico e na estabilidade dos materiais. HTa apresentou a maior umidade da monocamada ($X_0 = 0,1105 - 0,0982 \text{ g H}_2\text{O/g s.s.}$), que diminuiu com a temperatura. O HJe apresentou os parâmetros GAB (C e K) e Q_{st} mais elevados ($55,9-54,77 \text{ kJ/kmol}$), e um ΔS de $29,695 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$. Valores negativos de ΔG indicaram adsorção espontânea. O A_s foi superior para o HTa ($390,14 \text{ m}^2/\text{g}$ a 20°C), enquanto o seu E_a foi o mais baixo ($4,52 \text{ kJ/mol}$), refletindo uma rápida adsorção. Recomenda-se a secagem das farinhas até X_0 e a utilização de recipientes impermeáveis, especialmente para HTa, devido à sua elevada área exposta. Os resultados fornecem uma base científica para otimizar o processamento, armazenamento e aplicação industrial dessas farinhas em produtos alimentares e farmacêuticos com potencial nutracéutico.

Palavras-chave: propriedades termodinâmicas; hidrólise ácida-enzimática; modelo GAB



Introducción

La práctica de fermentar alimentos es una tradición arraigada en países sudamericanos desde hace siglos, con especial énfasis en las comunidades andinas [1, 2]. En los Andes, se ha utilizado la fermentación como método para preservar alimentos nativos como la papa, una tradición que persiste hasta hoy y que se ha enriquecido con innovaciones a lo largo del tiempo [3]. La elaboración de productos como el chuño blanco o negro mediante secado al sol, así como el tocosh a través de la fermentación, son ejemplos destacados de este proceso [4].

Por su parte, aunque el jengibre no es originario de los Andes, fue integrado en prácticas medicinales andinas influenciadas por el legado incaico. Los incas valoraban las plantas curativas y su conocimiento facilitó el uso terapéutico del jengibre, manteniendo una visión holística de la salud. Frente a esto, la escasez de estudios comparativos sobre las propiedades de adsorción de humedad y los parámetros termodinámicos de harinas no convencionales, como las obtenidas a partir de tocosh de papa y jengibre, constituye una limitación significativa para su adecuada caracterización y potencial aplicación en procesos industriales.

El tocosh de papa (*Solanum tuberosum*) es ampliamente consumido por sus beneficios curativos. Su proceso de obtención implica sumergir la papa en pozas de agua corriente durante nueve meses aproximadamente [5]. Este producto, reconocido por su aroma penetrante y su sabor ácido característico debido a su fermentación ácido-láctica, se distingue por su alto contenido calórico, principalmente debido a su composición rica en carbohidratos, como el almidón, y por su actividad antioxidante [3, 6, 7]. Debido al proceso fermentativo se genera glucosa, fructosa y maltosa. Además, contiene penicilina natural, un componente con propiedades antibióticas [3, 5], así como compuestos fenólicos, aminoácidos, esteroides y alcaloides, los cuales ejercen acción antimicrobiana frente a la *Escherichia coli* y el *Staphylococcus aureus* [8, 9]. Además, la harina de tocosh (HTs, **figura 2**), tratada con alfa-amilasa y ácido clorhídrico, puede adsorber mayor cantidad de agua debido al aumento de sitios activos proveniente de las hidrólisis de los almidones, generando harinas más dulces que podrían ser utilizadas en postres y productos nutracéuticos de mayor digestibilidad.

El jengibre también es una planta ampliamente empleada, no solo a nivel alimentario, sino también con fines medicinales para el tratamiento de la artritis, la hipercolesterolemia, el asma, el estreñimiento, la diabetes y el cáncer. Puede ser aprovechado en pasta, polvo cristalino o almíbar [10], y su composición revela niveles significativos de compuestos bioactivos como los gingeroles [11, 12], así como una presencia notable de compuestos fenólicos, lo que le otorga propiedades antioxidantes elevadas [13].

Dado que tanto el tocosh de papa como el jengibre poseen propiedades antioxidantes y antimicrobianas, su combinación podría potenciar estos efectos beneficiosos. Por ejemplo, para la elaboración de productos funcionales como panes, bebidas fermentadas o suplementos alimenticios, la sinergia entre ambos ingredientes podría mejorar la salud digestiva y fortalecer el sistema inmunológico [6].

La información sobre el desarrollo de isoterma de adsorción de agua es limitada, tanto de la harina de tocosh en sus diversas presentaciones (sin hidrolizar, hidrolizada por α -amilasa e hidrolizada por HCl) como del jengibre. Su modelación es importante para la industria alimentaria, ya que permitiría optimizar procesos como el de secado y mezclado, mejorar la calidad del producto, facilitar la selección de materiales de empaque que controlen adecuadamente el intercambio de humedad entre el alimento y su entorno, y desarrollar nuevos productos [14, 15].

De los modelos existentes para este propósito, se ha documentado que la ecuación de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) es el modelo que mejor describe el comportamiento de adsorción de humedad en más del 50% de las 163 frutas, carnes y verduras, mejor que los modelos de dos parámetros (Henderson, Oswin, Smith, Halsey, entre otros) [16]. Dado que tanto el tocosh como el jengibre presentan matrices complejas ricas en compuestos bioactivos con alta capacidad antioxidante, se espera que las isoterma de sorción de humedad de ambas harinas se ajusten adecuadamente al modelo de GAB, lo cual respaldaría la validez de dicho modelo para describir el comportamiento higroscópico de materiales de esta naturaleza.

La evaluación de las isoterma de adsorción permite determinar la cantidad de vapor de agua que se adsorbe en un material a diferentes niveles de humedad, temperatura [17] y presión constante. Siendo la temperatura la de mayor influencia sobre la humedad de equilibrio, al influir en la energía cinética de las moléculas de agua y la fuerza de interacción entre estas y el material [18]. No obstante, este comportamiento no es uniforme para todas las harinas, ya que la magnitud del efecto térmico depende estrechamente de la composición bioquímica de cada matriz, particularmente del contenido de almidón, proteínas, fibra dietaria y compuestos fenólicos, los cuales influyen en la cantidad y naturaleza de los sitios de adsorción. A mayor temperatura, la capacidad de adsorción del material disminuye, mientras que, a menor temperatura, aumenta [19]. La humedad de equilibrio de las harinas de tocosh y de jengibre podría verse afectada significativamente por la temperatura, mostrando una menor capacidad higroscópica a temperaturas elevadas. Esta respuesta es altamente dependiente de la estructura molecular y de la composición fisicoquímica del sustrato, lo que sugiere un comportamiento específico del material frente a la energía térmica aplicada.

Las propiedades termodinámicas de las isoterma de sorción, como el calor de adsorción, la entropía de adsorción (ΔS), la energía libre de Gibbs (ΔG) y la entalpía de adsorción, permiten un análisis de la relación molecular entre el vapor de agua y un material [20–22]. Estas propiedades se pueden determinar mediante diferentes métodos y son útiles para comprender los mecanismos de adsorción/desorción, diseñar procesos de secado/humidificación, predecir la estabilidad de productos y desarrollar nuevos materiales con propiedades de adsorción específicas [23]. El análisis termodinámico, junto con otras caracterizaciones, proporciona una mayor comprensión del proceso de adsorción. El efecto de la humedad sobre estas propiedades es más complejo y depende del material y la temperatura. La temperatura influye de manera significativa en la humedad de equilibrio de las harinas, reduciendo su capacidad de adsorción a medida que aumenta. Sin embargo, este efecto térmico depende de la composición bioquímica específica de cada tipo de harina, lo que sugiere una interacción compleja entre sus componentes y la energía térmica disponible [24–27].

El presente trabajo busca cerrar la brecha entre el conocimiento tradicional y la tecnología moderna, proporcionando bases científicas para escalar el uso de harinas como las del tocosh y el jengibre en la industria, garantizando su calidad y aprovechando sus propiedades funcionales. Por ello, esta investigación tuvo como objetivo evaluar y comparar las propiedades de adsorción de humedad, modeladas mediante la ecuación de GAB, y las características termodinámicas (calor isostérico, entropía, ΔG , área de adsorción (A_s) y energía de activación (E_a)) de harina de tocosh de papa (in natura, hidrolizada por enzima y por vía ácida) y de HJe.

Materiales y métodos

Obtención de las harinas

El tocosh de papa variedad “peruanita” en estado fermentado (figura 1) fue adquirido del Mercado Municipal de Huamachuco, La Libertad, Perú. Se le eliminó la cáscara y por secado a 50 °C durante 48 h, con posterior tamizado (< 1,0 mm), se obtuvo la harina de tocosh de papa *in natura* (HTs) (figura 2). Esta harina sirvió como base para obtener su versión hidrolizada por vía enzimática (HTE) y la hidrolizada por vía ácida (HTa).



Figura 1. Tocosh de papa.

Para obtener la HTE se preparó una solución al 10% en peso de HTs, se reguló el pH a 5,5 con HCl 0,01 N y se llevó a una temperatura de 50 °C, luego se adicionó α -amilasa (POMIZYME FA 100) en una concentración de 10 ppm. La hidrólisis enzimática se realizó por 5 h en un envase con cierre hermético previamente esterilizado (121 °C por 10 min) y, posteriormente, la muestra fue secada (50 °C por 48 h), triturada y tamizada (< 1,0 mm).

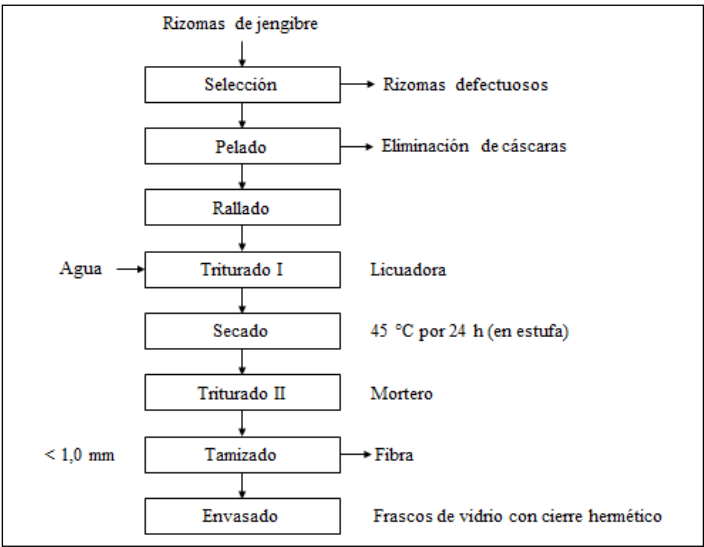


Figura 3. Flujoograma de proceso para la obtención de la harina de jengibre (HJe)

Para obtener la HTa se preparó una suspensión al 20% en peso de HTs, luego con una solución de HCl 0,01 N se reguló el pH hasta 2,5, se llevó a 50 °C y dejó hidrolizar por 3 h en un envase con cierre hermético, luego se evaporó el agua en estufa a 50 °C por 48 h, seguido de un triturado y tamizado. En ambos casos, la hidrólisis estuvo acompañada de una agitación de 80 rpm a través de un agitador orbital con incubación marca Thermo Scientific Shke4450 Shaker.

Por su parte, la HJe fue obtenida a partir de sus rizomas maduros, caracterizados por su piel dura y fibrosa, provenientes de Huamachuco, siguiendo el flujoograma de proceso presentado en la figura 3. Estos pasaron por un pelado manual, luego un rallado y triturado. El secado fue a 45 °C por 24 h en una estufa Ecocell-111 (Planegg, Alemania), al cabo del cual se trituró en un mortero para luego ser tamizado (< 1,0 mm).

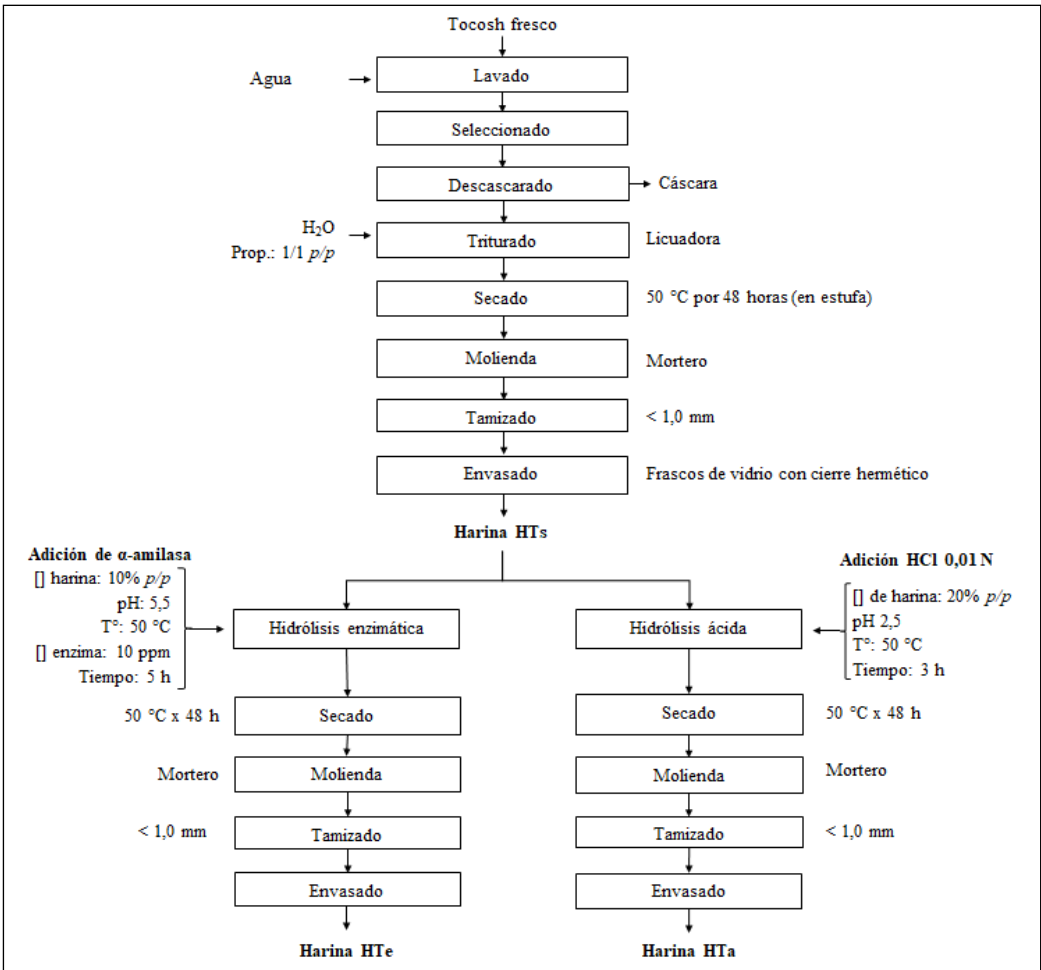


Figura 2. Flujoograma de proceso para la obtención de las harinas de tocosh: *in natura* (HTs), hidrolizada enzimáticamente (HTE) y hidrolizada por vía ácida (HTa).

Diagramación de las isotermas de adsorción de agua

Se elaboraron curvas de adsorción de agua para las harinas de to-cosh y jengibre utilizando intervalos de actividad de agua (a_w) de 0,1 a 0,9 y temperaturas de 20, 30 y 40 °C. Para controlar la a_w , se utilizaron soluciones de ácido sulfúrico de acuerdo con lo planteado por Bhandari y Adhikari [28] (tabla 1).

Tabla 1. Concentraciones de ácido sulfúrico (% p/p) que a diversas temperaturas (20, 30 y 40 °C) permiten obtener distintos valores de actividad de agua (a_w).

Temperatura (°C)	a_w								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	H_2SO_4 (% p/p)								
20	70,9	58,2	53,2	48,3	43,3	37,9	31,4	24,9	18,5
30	72,6	58,5	53,5	48,5	43,6	38,1	31,6	25,0	18,5
40	74,3	58,9	53,9	48,8	43,8	38,3	31,7	25,1	18,4

Una cantidad de 100 g de solución de ácido sulfúrico fue vertida en un recipiente de vidrio con cierre hermético de 1 L de capacidad, se utilizó un recipiente por cada solución de ácido aplicado (figura 4). Estos recipientes fueron luego colocados en estufa a temperaturas de 20, 30 y 40 °C durante 7 días para su posterior análisis mediante mediciones gravimétricas hasta llegar a peso constante. Para cada tipo de muestra y valor de temperatura, el monitoreo de los pesos se realizó por triplicado.

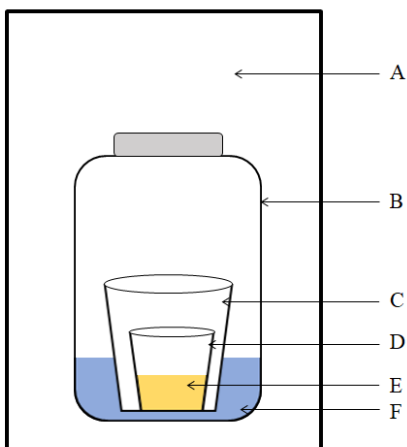


Figura 4. Disposición experimental para la diagramación de las isotermas de adsorción. A: estufa, B: frasco de vidrio con cierre hermético, C: vaso de vidrio, D: vaso que contiene la muestra, E: muestra de harina (aproximadamente 1 g), F: solución de ácido sulfúrico.

Ajuste al modelo de GAB

Los datos experimentales de humedad en equilibrio (X_e) para cada valor de a_w fueron modelados haciendo uso de la Ec. (1), correspondiente a la ecuación de GAB [29]:

$$\frac{X_e}{a_w} = \frac{X_0 \times C \times K}{(1 - K \times a_w)(1 - K \times a_w + C \times K \times a_w)} \quad (1)$$

Donde X_0 representa el contenido de humedad de la monocapa y C y K son las constantes cinéticas de absorción de humedad en monocapa y multicapa, respectivamente. La determinación de estos parámetros se realizó a través de una regresión de segundo orden obtenida del reordenamiento de la Ec. (1), empleando Excel. La Ec. (1) se expresa en su forma desarrollada en la Ec. (2) [29].

$$\frac{a_w}{X_e} = \frac{1}{X_0 \times C \times K} + \frac{C - 2}{X_0 \times C} a_w + \frac{K \times (1 - C)}{X_0 \times C} a_w^2 \quad (2)$$

Se determinó también el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMS) [29] mediante la Ec. (3) y la Ec. (4), respectivamente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_e - X_e^*)^2}{\sum_{i=1}^N (X_e - \bar{X})^2} \quad (3)$$

$$RMS = \frac{\sum_{i=1}^N (X_e^* - X_e)^2}{N} \quad (4)$$

Donde X_e es el i -ésimo contenido de humedad de equilibrio experimental, X_e^* es el i -ésimo contenido de humedad de equilibrio predicho, \bar{X} es la media aritmética de los valores observados X_e y N es el número de observaciones.

Determinación de las propiedades termodinámicas

La entalpía diferencial generalmente se denomina calor isostérico de sorción (Q_{st}), sus unidades son kJ/mol y se define como la suma del calor isostérico neto de adsorción (q_{st}) y el calor latente de condensación del vapor de agua pura a la temperatura del sistema (L_v). La Ec. (5) presenta esta relación:

$$Q_{st} = q_{st} + L_v \quad (5)$$

Donde q_{st} a un contenido de humedad constante (X_e) se puede calcular a partir de los datos experimentales de la isoterma de sorción con la ecuación de Clausius Clapeyron [30], al graficar el $\ln(a_w)$ vs el inverso de la temperatura absoluta (Kelvin) [31] tal como se muestra en la Ec. (6):

$$\ln(a_w) = \frac{-q_{st}}{T} \times \frac{1}{T} + C \quad (6)$$

Donde q_{st} es el calor isostérico neto de sorción (kJ/mol), T es la temperatura absoluta (K), R es la constante de los gases ($8,314 \times 10^{-3}$ kJ/mol.K) y C es una constante, de la cual se despeja la entropía de sorción, como se observa en la Ec. (7) [32]:

$$C = \frac{\Delta S}{R} \quad (7)$$

La ΔG se calculó con base en la ecuación de Gibbs Helmholtz [33]:

$$\Delta G = R \times T \times \ln(a_w) \quad (8)$$

La teoría de la compensación entalpía-entropía se utiliza para evaluar los fenómenos físicos y químicos que prevalecen en los procesos de sorción. Esta teoría propone una relación lineal entre Q_{st} y ΔS [29]:

$$Q_{st} = T_\beta + \Delta G_\beta \quad (9)$$

Donde la temperatura isocinética (T_β) es la temperatura a la que todas las reacciones de sorción se desarrollan a la misma velocidad y la energía libre (ΔG_β) ayuda a determinar la espontaneidad de la sorción. Así, la sorción es espontánea si ΔG_β es negativa y lo contrario si es positiva ($\pm \Delta G_\beta$) [34].

Camaño et al. [35] recomiendan aplicar la teoría de compensación comparando la temperatura isocinética con respecto a la temperatura media armónica (T_{hm}), que se define como se presenta en la Ec. (10):

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (1/T)} \quad (10)$$

Donde n es el número de isotermas. La teoría de compensación sólo se puede aplicar si la T_β es diferente de la T_{hm} . El proceso es impulsado por entalpía cuando $T_\beta > T_{hm}$, mientras que, en la condición opuesta, está controlado por entropía.

La capacidad de retención de agua de los alimentos está estrechamente ligada a la superficie de adsorción, ya que una mayor superficie implica una mayor capacidad de absorción de agua por parte del alimento [36]. Para determinar el área superficial de adsorción de

las muestras de harina de tocosh y de harina de jengibre, se utilizó la Ec. (11) [37], empleando el contenido de humedad de monocapa obtenido mediante el modelo GAB.

$$A_s = \frac{X_0 \times N_A \times A_{H_2O}}{M_{H_2O}} = 3,53 \times 10^3 \times X_0 \quad (11)$$

Donde A_s es el área superficial de adsorción (m^2/g s.s.), X_0 es el contenido de humedad de la monocapa (g agua/ g s.s.), N_A es el número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ moléculas/mol/ g), A_{H_2O} es el área de la molécula de agua ($1,06 \times 10^{-19} m^2$) y M_{H_2O} es el peso molecular del agua ($18 g/mol$).

La E_a es la energía mínima necesaria para provocar una reacción química. Para los procesos de adsorción, una E_a negativa sugiere que una temperatura baja favorece el proceso, en cuyo caso el proceso de sorción se denomina exotérmico [38]. Por el contrario, una E_a positiva es una indicación de la presencia de una barrera energética en el proceso de sorción, lo que significa que el sistema requiere energía (aumento de temperatura) para impulsar el proceso de sorción, por lo que dicho proceso de sorción se denomina endotérmico [39]. La E_a de los procesos de adsorción se estimó mediante la ecuación de Arrhenius a partir de la pendiente de la gráfica del inverso de la temperatura absoluta ($1/T$) vs. El logaritmo natural (\ln) de la monocapa de GAB, tal como muestra en la Ec. (12):

$$\ln(X_0) = \frac{-E_a}{R \times T} + \ln(X_{0i}) \quad (12)$$

Donde X_{0i} es el factor de Arrhenius y R la constante universal de los gases.

Análisis estadístico

Con los valores de monocapa se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para contrastar la hipótesis de igualdad de medias ($X_0(20^\circ C) = X_0(30^\circ C) = X_0(40^\circ C)$) con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$; cuando el estadístico F superó el valor crítico (o $p < 0,05$), se rechazó la igualdad general, indicando que la temperatura sí afecta el contenido de humedad de la monocapa. Luego, con el test de Fisher se calculó la diferencia mínima significativa (LSD) y las diferencias absolutas entre pares de medias $|X_{020^\circ C} - X_{030^\circ C}|$, $|X_{020^\circ C} - X_{040^\circ C}|$ y $|X_{030^\circ C} - X_{040^\circ C}|$. Cuando alguna diferencia excedió el LSD, se concluyó que esas temperaturas difieren significativamente en el valor de monocapa al 95% de confianza. Estas evaluaciones se realizaron utilizando el software estadístico Statgraphics Centurion 19 (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, Virginia).

Resultados y discusión

Isotermas de adsorción de las harinas de tocosh de papa y de jengibre

Las isotermas de adsorción de humedad en los tres tipos de harinas de tocosh de papa y en la HJe se muestra en la figura 5, todas ellas a 20, 30 y 40 °C. La humedad de equilibrio ($g H_2O/g$ s.s.) fue menor al incrementarse la temperatura a una misma a_w . Para las condiciones de almacenamiento en Huamachuco (20°C y 70% de humedad relativa), la HJe tendría una humedad de equilibrio de 0,26 $g H_2O/g$ s.s en comparación a la HTs, que tiene 0,189 $g H_2O/g$ s.s. En la HTs, al incrementar la temperatura de 20 a 40 °C, se observó una disminución desde 0,298 hasta 0,244 $g H_2O/g$ s.s., en la HTe, esta disminución fue desde 0,328 hasta 0,264 $g H_2O/g$ s.s., en la HTa, disminuyó desde 0,353 hasta 0,293 $g H_2O/g$ s.s., y en la HJe, la disminución fue desde 0,438 hasta 0,364 $g H_2O/g$ s.s., todas ellas determinadas para $a_w = 0,9$.

De acuerdo con Aviara [40], la temperatura desempeña un papel fundamental en las isotermas de adsorción de agua, a medida que incrementa la temperatura, la capacidad de absorción de agua de un material generalmente disminuye. Esto se debe a que, a mayor

temperatura, las moléculas de agua tienen mayor energía cinética, lo que les facilita escapar de la superficie del material adsorbente [36, 41] a causa de un descenso de la energía de interacción entre las moléculas de agua y el material alimentario [15]. Por otro lado, la presión de vapor del agua se incrementa con la temperatura, lo que crea una mayor gradiente de concentración entre el material y el aire circundante, favoreciendo la desorción [42]. A una condición de a_w de 0,9, se observa que la HJe es la más higroscópica; por lo tanto, para efectos de almacenamiento y conservación debe controlarse la humedad relativa de su entorno.

Peleg [43] considera que la adsorción de vapor de agua por alimentos en general se parece más a la sorción química que a la adsorción física de un gas inerte sobre una superficie sólida, de donde se originó el concepto de monocapa. Sin embargo, se ha sugerido que molecularmente el agua en forma de vapor interactúa con grupos hidrófilos como $-OH$ o $-NH_2$, que en los alimentos son mucho más abundantes que los sitios físicos en los que pueden asentarse las moléculas de un gas inerte. Entre los sitios hidrofílicos que sugiere están las macromoléculas como proteínas y almidones.

Hasan [44] recomienda temperaturas de almacenamiento entre 27,5 y 37,5 °C, con humedades relativas entre 38 y 54% para mantener la estabilidad de la harina de trigo. En la tabla 2 se presentan las humedades de equilibrio de HTs, HTe, HTa y HJe evaluadas en condiciones de 30 °C con 40% de humedad relativa. HTs, HTe y HTa mostraron humedades de equilibrio experimentales promedio de 0,0978; 0,1079 y 0,1265 $g H_2O/g$ s.s., respectivamente; mientras que, en estas mismas condiciones, la HJe mostró un valor promedio de 0,1447 $g H_2O/g$ s.s. En todos los casos, los valores de RMS inferiores al 10% confirman el buen ajuste del modelo de GAB a los datos experimentales. En todos los casos, las harinas presentan humedades inferiores al máximo permitido por la Norma Técnica Peruana 011.451:2013, que establece que la humedad máxima para harina de productos andinos no debe exceder el 15% [45].

Tabla 2. Humedad de equilibrio (X_e) experimental y de GAB a 30 °C y 40% de humedad relativa.

Tipo de harina	X_e experimental ($g H_2O/g$ s.s.)	X_e GAB ($g H_2O/g$ s.s.)	Error estándar
HTs	0,0978 ± 0,0004	0,0994 ± 0,0001	1,71 ± 0,53
HTe	0,1079 ± 0,0003	0,1055 ± 0,0002	2,25 ± 0,34
HTa	0,1265 ± 0,0012	0,1189 ± 0,0011	6,03 ± 0,80
HJe	0,1447 ± 0,0016	0,1441 ± 0,0005	0,97 ± 0,29

HTs: harina de tocosh de papa (*in natura*).
HTe: harina de tocosh de papa hidrolizada enzimáticamente (α -amilasa).
HTa: harina de tocosh de papa hidrolizado por vía ácida (HCl).
HJe: harina de jengibre.

Las variaciones en el grado de adsorción observadas entre las muestras pueden estar asociadas al tratamiento de secado previo aplicado antes del estudio isotérmico. Dicho proceso puede inducir modificaciones físicas, como la contracción de la matriz y el colapso parcial de los poros, así como alteraciones químicas que conducen a la desactivación de los sitios activos de adsorción presentes en las harinas. Estas transformaciones estructurales afectan la morfología superficial y la distribución de la porosidad, disminuyendo la accesibilidad de los sitios de unión para las moléculas de agua. En consecuencia, se produce una reducción en la capacidad de adsorción de humedad de los materiales durante el proceso isotérmico [46].

El aumento de temperatura provoca una disminución en la energía de unión de las moléculas de agua en las harinas de tocosh y de jengibre, lo que resulta en una disminución de las fuerzas de atracción entre los sitios de sorción y las moléculas de agua [47]. Por lo tanto, el grado de sorción de agua en ambas harinas disminuye.

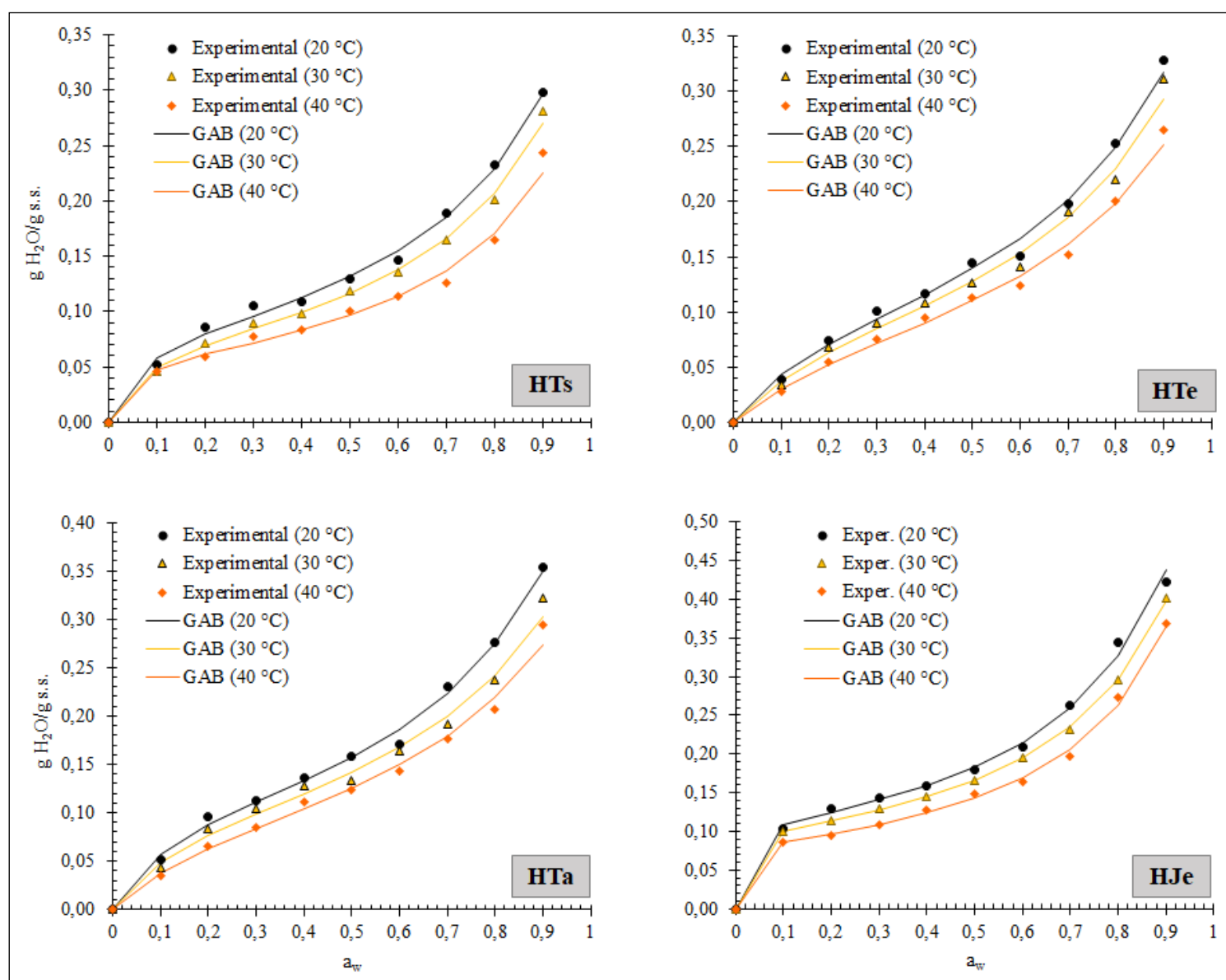


Figura 5. Isotermas de adsorción de agua de las harinas de tocosh (HTs, HTe y HTa) y de jengibre (HJe).

Brunauer *et al.* [48] presentan una clasificación de la forma de isoterma que se relaciona estrictamente con la manera en que el agua es absorbida. En esta clasificación, las harinas de tocosh y jengibre presentaron una configuración sigmoidea de tipo II. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas en muestras de origen biológico (frutas, semillas y cereales), se indica, además, que este tipo de materiales presenta este comportamiento típico [24, 36, 49–51]. Según Sato *et al.* [52], la isoterma tipo II está más relacionada con la sorción de agua en alimentos en que predomina el almidón, como los cereales, tubérculos y algunas frutas.

De la figura 5 se deduce que la HTa muestra la mayor humedad de equilibrio, independientemente de la temperatura de almacenamiento. A esta le sigue HTe y la HTs. Se ha reportado que la hidrólisis enzimática del almidón en la harina aumenta su capacidad de absorber agua al romper las cadenas largas de almidón en moléculas más pequeñas, incrementando la solubilidad y la interacción con el agua [53, 54]. Esto genera una mayor viscosidad, mejora la textura y la gelatinización del almidón, y facilita su digestión [55]. La hidrólisis se utiliza en la panificación, elaboración de galletas y productos extrusionados para mejorar la calidad y las propiedades de los alimentos [56].

Por su parte, las muestras de HJe mostraron una elevada humedad de equilibrio comparada con las otras muestras, esto se puede atribuir a que el jengibre posee una mayor concentración de fibra, cercana al 10% [57], comparada con el tocosh que es rico en almi-

dón. Se ha demostrado que la fibra posee una elevada capacidad de absorber las moléculas de agua gracias a su estructura porosa y su gran superficie, que aumenta el área de contacto con el agua, lo que permite que la fibra absorba más agua por capilaridad [58]. La fibra contiene grupos hidroxilo ($-OH$) que forman puentes de hidrógeno con el agua, estos enlaces atraen el agua hacia la fibra, lo que aumenta su capacidad de adsorción [59].

Determinación de los parámetros de GAB

Los parámetros del contenido de humedad de la monocapa (X_0), constantes C y K , R^2 y RMS correspondientes al modelo de GAB de las isotermas de harina de tocosh y HJe se presentan en la tabla 3. Los valores de X_0 a 20 °C fueron de 0,0852; 0,1042 y 0,1105 g H_2O/g s.s. en HTs, HTe y HTa, respectivamente. Sin embargo, se observó una disminución al pasar a 40 °C, con valores de 0,0593; 0,0880 y 0,0982 g H_2O/g s.s., respectivamente. Este efecto se ha reportado también para harinas de camote morado, mashua, oca blanca, oca amarilla y oca roja, con valores entre 0,05 y 0,04; 0,07 y 0,05; 0,06 y 0,04; 0,05 y 0,03; y 0,06 y 0,05 g H_2O/g s.s., respectivamente, al pasar de 20 a 40 °C [60]. En harina de yuca fermentada se ha reportado que el incremento de la temperatura de 30 a 42 °C, lo cual provoca una disminución de X_0 desde 0,0556 hasta 0,0053 g H_2O/g s.s. [61].

El X_0 indica la cantidad de moléculas de agua que están fuertemente adsorbidas en la superficie del alimento, y es el valor en agua en el cual una harina llega a su máxima estabilidad de conservación [62].

Tabla 3. Parámetros del modelo de GAB.

Harina	Parámetro	Temperatura (°C)		
		20	30	40
HTs	X_0 (g H ₂ O/g s.s.)	0,0852 ± 0,0005	0,0757 ± 0,0025	0,0593 ± 0,0045
	C	19,079 ± 41,83	17,1975 ± 42,5	31,4097 ± 12,14
	K	0,7984 ± 0,0033	0,8061 ± 0,0034	0,8222 ± 0,0026
	R ²	0,9982 ± 0,0002	0,9986 ± 0,0011	0,9967 ± 0,0012
	RMS (%)	4,187 ± 0,7765	2,8542 ± 0,7035	3,888 ± 0,7046
HTe	X_0 (g H ₂ O/g s.s.)	0,1042 ± 0,0039	0,0972 ± 0,0011	0,088 ± 0,0044
	C	7,5752 ± 46,16	6,8678 ± 24,26	5,9625 ± 20,97
	K	0,7661 ± 0,0023	0,765 ± 0,0039	0,751 ± 0,0047
	R ²	0,998 ± 0,0005	0,9991 ± 0,0002	0,9978 ± 0,0006
	RMS (%)	4,2919 ± 0,6679	4,6088 ± 0,4328	4,2267 ± 0,3095
HTa	X_0 (g H ₂ O/g s.s.)	0,1105 ± 0,0007	0,1041 ± 0,003	0,0982 ± 0,0041
	C	10,9568 ± 74,91	9,5516 ± 59,17	6,9029 ± 50,95
	K	0,7727 ± 0,002	0,7478 ± 0,0021	0,7395 ± 0,0049
	R ²	0,9924 ± 0,0003	0,9996 ± 0,0002	0,999 ± 0,0007
	RMS (%)	3,7167 ± 0,5935	5,3703 ± 0,4269	3,6162 ± 0,3381
HJe	X_0 (g H ₂ O/g s.s.)	0,1069 ± 0,0009	0,0963 ± 0,0009	0,0818 ± 0,0001
	C	162,1716 ± 22,3769	255,4841 ± 80,8375	231,8445 ± 8,0184
	K	0,8502 ± 0,0154	0,8432 ± 0,0029	0,862 ± 0,0014
	R ²	0,9922 ± 0,0001	0,9916 ± 0,0003	0,9932 ± 0,0001
	RMS (%)	2,8653 ± 0,2017	0,6544 ± 0,1331	2,0138 ± 0,0968

HTs: harina de tocosh de papa (*in natura*).
HTe: harina de tocosh de papa hidrolizada enzimáticamente (α-amilasa).
HTa: harina de tocosh de papa hidrolizado por vía ácida (HCl).
HJe: harina de jengibre.
 X_0 : contenido de humedad de la monocapa.
C: constante cinética de absorción de humedad en monocapa.
K: constante cinética de absorción de humedad multicapa.
R²: coeficiente de determinación.
RMS: error cuadrático medio.

Los mayores valores de monocapa se encontraron en las muestras de HTa. Cada harina tiene un contenido de humedad de monocapa que lo hace único y que a esta condición logra la mayor estabilidad enzimática y microbiológica [43]. La hidrólisis ácida rompe enlaces glucosídicos de forma menos específica que la enzimática, generando extremos más reactivos y grupos funcionales hidrofílicos (-OH, -COOH) que pueden formar puentes de hidrógeno con el agua aumentando su afinidad en la fase de monocapa. Si la HJe tiene humedades por debajo del valor de monocapa (0,1069 – 0,0818 g H₂O/ g s.s.) puede sufrir rancidez oxidativa de sus ácidos grasos insaturados como gingeroles, afectando su sabor y propiedades antioxidantes.

El X_0 es un parámetro importante porque representa el contenido de humedad en el cual la velocidad de cualquier reacción asociada será insignificante, debido a la fuerte unión del agua a la superficie [63]. Observamos que, en todas las muestras, al pasar la temperatura de 20 a 40 °C, el contenido de humedad de monocapa disminuyó ($p < 0,05$) (tabla 4). Este fenómeno se puede explicar por el número de sitios activos que se reducen con el incremento de temperatura, producto de las modificaciones de las características físicas y químicas de la matriz alimentaria [43, 64]. Además, según Samapundo *et al.* [65], las moléculas de agua pueden desprenderse de sus sitios de sorción fácilmente a altas temperaturas, ya que la distancia, la atracción y los estados de excitación de las moléculas

también interfieren en los sitios de sorción a medida que la temperatura cambia.

Los parámetros X_0 , C y K tienen significado físico; dependen de las características del producto y muestran una dependencia Arrheniusiana de la temperatura [66]. Se ha demostrado que la variable K de la ecuación de GAB deben ser $0 < K \leq 1$, mientras que el parámetro C esencialmente debe ser $C > 0$ [67].

La constante C está asociada con el potencial químico y refleja las diferencias entre la monocapa y las capas superiores [68]. Además, si el parámetro $C \geq 2$, la ecuación GAB da una curva de forma sigmoidea con un punto de inflexión tipo II [68]. Los valores de C para la HJe son superiores a sus correspondientes de harina de tocosh en sus diversas presentaciones; esto se debe probablemente a que contiene más compuestos fenólicos y fibra, generando sitios de alta energía para la adsorción de agua, en contraste con los almidones en tocosh, que pierden organización tras su hidrólisis.

Lewicki [69] informó que el modelo de GAB describe bien las isotermas sigmoidales tipo II cuando los parámetros K y C se mantienen en los rangos $0,24 < K \leq 1$ y $5,76 \leq C \leq \infty$. Esto concuerda con los valores encontrados para las harinas de tocosh y de jengibre. Para isoterms de tipo III, generalmente el valor de C está en el rango $0 < C \leq 2$, sin punto de inflexión [69].

Tabla 4. Prueba de comparaciones múltiples del contenido de humedad de la monocapa.

Temperatura	Tipo de harina	Casos	Media	Grupos homogéneos	Contraste	Significancia	Diferencia
20 °C	HTs	3	0,0852	X	HTs - HTe	*	-0,0182
	HTe	3	0,1042	X	HTs - HTa	*	-0,0251
	HTa	3	0,1105	X	HTe - HTa	*	-0,0069
30 °C	HTs	3	0,0757	X	HTs - HTe	*	-0,0231
	HTe	3	0,0972	X	HTs - HTa	*	-0,0290
	HTa	3	0,1041	X	HTe - HTa	*	-0,0059
40 °C	HTs	3	0,0593	X	HTs - HTe	*	-0,0393
	HTe	3	0,0880	X	HTs - HTa	*	-0,0399
	HTa	3	0,0982	X	HTe - HTa	*	-0,0006
20 °C	HJe	3	0,1069	X	20 °C - 30 °C	*	0,0106
30 °C	HJe	3	0,0963	X	20 °C - 40 °C	*	0,02505
40 °C	HJe	3	0,0818	X	30 °C - 40 °C	*	0,01445

HTs: harina de tocosh de papa (*in natura*).
HTe: harina de tocosh de papa hidrolizada enzimáticamente (α -amilasa).
HTa: harina de tocosh de papa hidrolizado por vía ácida (HCl).
HJe: harina de jengibre.

* Indica diferencia significativa
± Límites para las harinas de tocosh (HTs, HTe y HTa): 20 °C = 0,0021; 30 °C = 0,0031; 40 °C = 0,0029
± Límite para la harina de jengibre (HJe): 0,0022

El parámetro K para la harina de tocosh (HTe y HTa) disminuyó al aumentar la temperatura. Esta tendencia también fue reportada para harina de maíz [70]. Los parámetros C y K relacionan las energías de unión asociadas con la sorción mono y multicapa de agua a la matriz alimentaria. La constante K corresponde a la diferencia en el potencial químico entre la monocapa y el agua libre [16, 71]. Niveles más altos (debido a mayores temperaturas) conducen a una rápida desorción y transición de la molécula de agua entre agua multicapa y agua libre. El rango del valor K (< 1) está de acuerdo con el significado físico; si sus valores fueran superiores a 1, esta tendencia indicaría una sorción infinita [72]. A mayor valor de K se infiere que el calor de sorción de la multicapa es mayor a temperaturas más altas. Los valores de C en todas las muestras fueron mucho más altos que los de K, lo que indica que el calor de sorción de la primera capa es mayor que la multicapa [16].

Propiedades termodinámicas

En la **tabla 5** se muestran el valor promedio del Q_{st} , la ΔS , la ΔG , el A_s y la E_a de las isothermas de adsorción de humedad de las harinas de tocosh y jengibre.

Cuando una molécula de gas se adsorbe en la superficie de un sólido, puede liberar o absorber energía en forma de calor. El Q_{st} es la cantidad de calor que debe suministrarse o eliminarse para mantener constante la cobertura superficial (es decir, la cantidad de gas adsorbido) a medida que la temperatura cambia [73]. El Q_{st} de la HJe tiene un valor mayor que las del tocosh. Cuando el Q_{st} tiene valores altos, indica que se requiere una cantidad significativa de energía para adsorber las moléculas de agua sobre la superficie de la harina. Esto puede implicar una interacción fuerte entre el adsorbato (agua) y el adsorbente (harinas), lo que resulta en una adsorción más difícil a medida que aumenta la carga de adsorbato en el adsorbente [31]. El calor total de sorción es el valor energético que se necesita para que moléculas de vapor de agua se adhieran a una superficie sólida o viceversa, y es importante para seleccionar adecuadamente las condiciones de secado y almacenamiento [74].

Al igual que con el Q_{st} , la HJe mostró los valores más altos de ΔS , este parámetro indica un aumento en la aleatoriedad del sistema. Esto ocurre porque las moléculas de agua se adsorben en la super-

ficie del sólido de forma desordenada durante la adsorción. Cuando la entropía de sorción en la isoterma de GAB tiene valores altos, indica una mayor dispersión y desorden molecular durante el proceso de adsorción. Esto puede implicar una mayor variabilidad en la configuración molecular y una mayor libertad de movimiento de las moléculas adsorbidas en la superficie del adsorbente [75, 76].

La ΔG fue negativa en todos los casos, indicando una absorción espontánea. En otras palabras, la absorción de las moléculas de agua en las harinas de tocosh y jengibre se produce de forma natural y no requiere energía adicional para que se lleve a cabo. Asimismo, dentro de las muestras de tocosh, la HTa presenta la mayor espontaneidad debido a que ΔG es tiene el valor más bajo. Cuando la ΔG en la isoterma de GAB tiene valores altos, indica que el proceso de adsorción es menos espontáneo y que se necesita una mayor energía para que la adsorción ocurra. Esto puede implicar una adsorción menos favorable y una menor tendencia del sistema a adsorber el adsorbato en la superficie del adsorbente [31].

El A_s está relacionada directamente con X_0 , por lo tanto, la HTa mostró los valores más altos de A_s , la cual disminuye al incrementar la temperatura. Cuando el A_s tiene valores bajos, implica que el adsorbente tiene una superficie disponible limitada para la adsorción del adsorbato, lo que resulta en una capacidad de adsorción más limitada y una eficiencia de retención más baja [31]. Una mayor A_s en las harinas HTe y HTa, comparada con HTs, se atribuye al hecho que la hidrólisis libera azúcares simples. Se reporta que un mayor contenido de azúcares reductores se asocia con una mayor capacidad de adsorción de humedad, al incrementarse los sitios hidrofílicos disponibles para la formación de puentes de hidrógeno con agua [77]. El área total disponible de grupos hidrófilos para la unión con las moléculas de agua disminuye al aumentar la temperatura. La gran área de los sitios activos de unión se atribuye a la existencia de muchas estructuras micro y nano porosas intrínsecas como las de los sólidos solubles [78].

Con un contenido de humedad bajo, el agua se adhiere a los sitios de unión más fuertes en la superficie activa de los sólidos, tal vez en la superficie de los capilares de tamaño nano [79]. A medida que se incrementa la humedad, el material alimenticio tiende a hincharse

Tabla 5. Parámetros termodinámicos de adsorción de agua en harinas de tocosh y jengibre.

Tipo de harina	Temperatura (°C)	Q_{st} (kJ/kmol)	ΔS (kJ/kmol.K)	ΔG (kJ/kmol)	AS (m ² /g s.s.)	E_a (kJ/mol)
HTs	20	53,667 ± 0,021	26,244 ± 0,169	-9,334 ± 4,046	301,021 ± 1,462	13,752 ± 0,225
	30	53,213 ± 0,038		-9,582 ± 4,241	267,537 ± 1,797	
	40	52,805 ± 0,025		-9,793 ± 4,403	206,540 ± 2,545	
HTe	20	52,480 ± 0,265	21,183 ± 0,264	-7,318 ± 3,443	366,712 ± 3,068	6,455 ± 0,670
	30	51,640 ± 0,299		-7,415 ± 3.505	345,413 ± 2,003	
	40	51,055 ± 1,081		-7.553 ± 3,606	315,071 ± 3,944	
HTa	20	53,887 ± 0,047	26,034 ± 0,446	-11,440 ± 0,176	390,141 ± 7,803	4,516 ± 0,125
	30	53,120 ± 0,596		-11,947 ± 0,061	369,868 ± 4,243	
	40	52,727 ± 0,532		-12,173 ± 0,039	348,862 ± 7,214	
HJe	20	55,929 ± 0,444	29,695 ± 2,021	-13,709 ± 1,109	377,394 ± 3,013	10,179 ± 0,334
	30	55,465 ± 0,448		-14,030 ± 1,131	339,820 ± 3,021	
	40	54,777 ± 0,680		-14,350 ± 1,151	288,819 ± 0,253	

HTs: harina de tocosh de papa (*in natura*).
HTe: harina de tocosh de papa hidrolizada enzimáticamente (α-amilasa).
HTa: harina de tocosh de papa hidrolizado por vía ácida (HCl).
HJe: harina de jengibre.
 Q_{st} : calor isostérico.
 ΔS : entropía.
 ΔG : energía libre de Gibbs.
As: área de adsorción.
 E_a : energía de activación.

y a abrir nuevos sitios para que la humedad se una a los alimentos. Por lo tanto, se requiere un nivel bajo de calor de sorción con un alto contenido de humedad en los materiales alimenticios [80], en lugar de un contenido bajo de humedad.

Por otra parte, el área de superficie específica de las harinas alimentarias calculada bajo la Ec. (9) es independiente del tamaño de partícula; ya que solo toma en consideración aquella área afín a la molécula de agua [38]. La E_a fue mayor en HTs y menor en HTa, esta energía proporciona información sobre la rapidez con la que ocurre el proceso de adsorción y sobre las condiciones en las que es más probable que ocurra [81]. Una E_a más baja indica que el proceso de adsorción es más fácil de iniciar, mientras que una E_a más alta indica que se necesita mayor energía para que las moléculas de agua se adsorban en la superficie de la harina.

Para garantizar un almacenamiento óptimo, es importante que las harinas sean secadas hasta niveles cercanos o inferiores a su X_0 , ya que en este punto se minimizan las reacciones químicas y el crecimiento microbiano; con Q_{st} sabemos cuánta energía necesitamos para llegar a esa humedad. En almacenamiento, es importante mantener la temperatura por debajo de 25 °C (ya que al incrementar la temperatura disminuye el X_0 y el As, pero podría favorecerse la adsorción si la humedad relativa aumenta), y es importante controlar la humedad ambiental para que no exceda el equilibrio correspondiente a X_0 , dado que una E_a baja implica que la harina absorberá humedad con mayor facilidad.

Por otro lado, se deben seleccionar empaques con muy baja permeabilidad al vapor de agua (multilaminados con EVOH o polietileno metalizado) o incorporar desecantes, especialmente si el As es alto (como en las harinas hidrolizadas, donde los azúcares reductores incrementan sitios hidrofílicos), pues así se limita que la harina, cuyo ΔG negativo la hace adsorber agua de forma espontánea, pierda su estabilidad. En conjunto, estos parámetros termodinámicos nos permiten definir la humedad de secado, la temperatura y las

condiciones de empaque para maximizar la vida útil de las harinas.

La relación entre entalpía (calor isostérico) y entropía para la adsorción de humedad en las harinas de tocosh y jengibre se presenta en la figura 6. En el gráfico, se muestra la ecuación ajustada que describe esta correlación, la cual exhibe un coeficiente de determinación muy próximo a 1. Este coeficiente indica la capacidad del modelo para explicar de manera precisa los valores observados, confirmando una alta fiabilidad a los resultados obtenidos.

La T_{hm} fue de 302,93 K, diferente de la T_β para cada tipo de harina, lo que confirma la idoneidad de la teoría isocinética. Y puesto que $T_\beta < T_{hm}$, el proceso está controlado por la entropía.

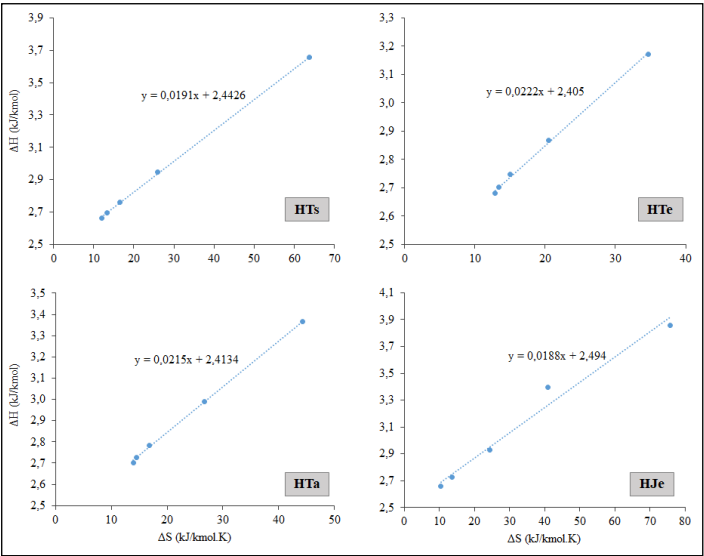


Figura 6. Correlación entre entalpía y entropía para la sorción de humedad en las harinas de tocosh y de jengibre. HTs: harina de tocosh de papa (*in natura*), HTe: harina de tocosh de papa hidrolizada enzimáticamente (α-amilasa), HTa: harina de tocosh de papa hidrolizado por vía ácida (HCl), HJe: harina de jengibre.

Conclusiones

La aplicación del modelo de GAB permitió ajustar con buen grado de precisión las isothermas de adsorción de humedad de todas las harinas estudiadas ($RMS < 10\%$), confirmando su idoneidad para describir el comportamiento sigmoidal de tipo II observado en harina de tocosh de papa (in natura, enzimática y ácida) y de jengibre. Entre las harinas de tocosh, la fracción hidrolizada por vía ácida mostró la mayor capacidad de adsorción a 20 °C, tanto en términos de humedad de equilibrio como en el contenido de monocapa, seguida por la hidrolizada enzimáticamente y, finalmente, la harina sin tratamiento.

La HJe presentó los valores más altos de humedad de equilibrio y parámetros C y K, atribuidos a su mayor concentración de fibra y compuestos fenólicos, lo cual intensifica los sitios de alta energía para la adsorción. En el análisis termodinámico, la HJe exhibió el calor isostérico más elevado y la mayor entropía de adsorción, indicando interacciones más fuertes y desorden molecular durante la sorción; sin embargo, dentro de las harinas de tocosh, la HTa presentó la ΔG más negativa, señalando la mayor espontaneidad del proceso en esta muestra. La mayor A_s en la HTa y en la HJe junto con la baja E_a , sugiere una rápida iniciación del fenómeno de adsorción en estas harinas.

Estos resultados permiten definir estrategias de secado y almacenamiento: secar hasta humedades cercanas a X_0 para minimizar reacciones indeseables, mantener temperaturas por debajo de 25 °C para conservar X_0 , y emplear envases con baja permeabilidad al vapor de agua o desecantes en harinas con alta A_s para contrarrestar la adsorción espontánea, así se optimiza la estabilidad y vida útil de estos ingredientes.

Referencias

- [1] M. G. Izurieta y S. Tinajero, *Trayectorias de la alimentación andina y mesoamericana*, Quito, Universidad Andina Simón Bolívar, 2020. Disponible en: <https://repositorio.uasb.edu.ec/bits-tream/10644/7620/1/Izurieta%20M-CON-002-Trayectorias.pdf>.
- [2] A. Ferrari, G. Vinderola y R. Weill, *Alimentos fermentados: microbiología, nutrición, salud y cultura*, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Instituto Danone del Cono Sur, 2020.
- [3] M. E. Jimenez, C.M. O'Donovan, M. Fernandez y P.D. Cotter, "Microorganisms present in artisanal fermented food from South America", *Front. Microbiol.*, vol. 13, nro. 941866, pp. 1-18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.941866>.
- [4] F. Diestra, J. R. Ramos y G. P. Lacherre, *Costumbres y gastronomía de la provincia de Sihuas - Ancash*, Lima, Professionals On Line SAC, 2023.
- [5] F. Mayta et al., "Development of new experimental dentifrice of peruvian solanum tuberosum (tocosh) fermented by water stress: Antibacterial and cytotoxic activity", *J. Contemp. Dent. Pract.*, vol. 20, nro. 10, pp. 1206-1211, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-2681>.
- [6] E. F. Yábar, V. Reyes y J. Casas, "Evaluación de la actividad antioxidante y antibacteriana del tocosh de papa (*Solanum tuberosum*)", *J. Agric. Food Sci.*, vol. 1, nro. 1, pp. 47-52, 2020. Disponible en: <https://revistas.uncp.edu.pe/index.php/jafs/article/view/545>.
- [7] J. R. Velasco et al., "Tocosh flour (*Solanum tuberosum* L.): A Toxicological assessment of traditional peruvian fermented potatoes", *Foods*, vol. 9, nro. 719, pp. 1-16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9060719>.
- [8] K. S. Silva, T. C. Polachini, M. Luna-Flores, G. Luna-Solano, O. Resende y J. Telis, "Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions", *J. Food Process Eng.*, vol. 44, nro. 9, pp. 1-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13784>.
- [9] S. V. Paz y M. C. Ojeda, "Efecto antimicrobiano in vitro del extracto acuoso de *Solanum tuberosum* "papa fermentada" sobre *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*", *UCV Sci. Biomed.*, vol. 4, nro. 3, pp. 9-22, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18050/ucvscientiabiomedica.v4i3.01>.
- [10] M. N. Shaukat, A. Nazir y B. Fallico, "Ginger bioactives: A comprehensive review of health benefits and potential food applications", *Antioxidants*, vol. 12, nro. 2015, pp. 1-12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12112015>.
- [11] S. Mathur, S. Pareek, R. Verma, D. Shrivastava y B. Prakash, "Therapeutic potential of ginger bio-active compounds in gastrointestinal cancer therapy: the molecular mechanism", *Nutrire*, vol. 47, nro. 15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41110-022-00166-8>.
- [12] M. Zhang et al., "Ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) and its bioactive components are potential resources for health beneficial agents", *Phytother Res.*, vol. 35, nro. 2, pp. 711-742, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ptr.6858>.
- [13] Q. Q. Mao et al., "Bioactive compounds and bioactivities of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe)", *Foods*, vol. 8, nro. 185, pp. 1-21, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods8060185>.
- [14] O. P. Murphy, M. Vashishtha, P. Palanisamy y K.V. Kumar, "A review on the adsorption isotherms and design calculations for the optimization of adsorbent mass and contact time", *ACS Omega*, vol. 8, nro. 20, pp. 17407-17430, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155>.
- [15] S. Shimizu y N. Matubayasi, "Understanding sorption mechanisms directly from isotherms", *Langmuir*, vol. 39, nro. 17, pp. 6113-6125, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c00256>.
- [16] S. Abdullah, S. C. Keoh, H. M. Johar, N. A. Razak, A. R. Shaari y I. H. Rukunudin, "Mathematical modelling of moisture sorption isotherms by using BET and GAB models", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 932, nro. 1, p. 012037, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/932/1/012037>.
- [17] A. Metrane, A. Delhali, M. Ouikhalfan, A. Assen y Y. Belmabkhout, "Water vapor adsorption by porous materials: From chemistry to practical applications", *J. Chem. Eng. Data*, vol. 67, nro. 7, pp. 1617-1653, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.2c00145>.
- [18] G. S. Rosa, M. A. Moraes y L. A. A. Pinto, "Moisture sorption properties of chitosan", *J. Food Technol.*, vol. 43, nro. 3, pp. 415-420, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.09.003>.
- [19] F. R. Hay, S. Rezaei y J. Buitink, "Seed moisture isotherms, sorption models, and longevity", *Front. Plant Sci.*, vol. 13, nro. 891913, pp. 1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.891913>.
- [20] X. Cheng et al., "Water adsorption properties of microalgae powders: Thermodynamic analysis and structural characteristics", *J. Stored Prod. Res.*, vol. 101, p. 102093, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102093>.
- [21] M. Edrisi y T. A. G. Langrish, "Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder", *Food Sci. Technol.*, vol. 62, nro. 1, pp. 875-882, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.064>.
- [22] C. Madhusudan, C. T. Ramachandra, U. Nidoni, S. Hiregoudar, J. Ram, y N. Naik, "Moisture sorption isotherms and estimation of isosteric heat of sorption of donkey milk powder", *J. Food Process Preserv.*, vol. 46, nro. 5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.16604>.
- [23] G. Zhu, Q. Jin, Y. Liu, Y. Lin, J. Wang y X. Li, "Moisture sorption and thermodynamic properties of *Camellia oleifera* seeds as influenced by oil content", *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 14, nro. 1, pp. 251-258, 2021. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.5457>.
- [24] N. Maftoon, A. Alizadeh, A. Kazemiyani, A. Ehsan, S. Baghaei y F. Mirazimi, "Effects of thermodynamic properties of rice and ambient conditions on moisture migration during storage at naturally ventilated warehouses", *Arabian J. Chem.*, vol. 16, nro. 104761, pp. 1-16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arab>

- jc.2023.104761.
- [25] J. Martín, M. Vioque y R. Gómez, "Thermodynamic properties of moisture adsorption of whole wheat flour. Calculation of net isosteric heat", *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 47, nro. 7, pp. 1487–1495, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02996.x>.
 - [26] L. Tavares, L. R. Sousa, S. Magalhães da Silva, P. S. Lima y J. M. Oliveira, "Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of biodegradable polymers for application in food packaging industry", *Polymers*, vol. 15, nro. 7, pp. 1–15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071634>.
 - [27] S. Tunç y O. Duman, "Thermodynamic properties and moisture adsorption isotherms of cottonseed protein isolate and different forms of cottonseed samples", *J. Food Eng.*, vol. 81, nro. 1, pp. 133–143, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.015>.
 - [28] B. R. Bhandari y B. P. Adhikari, "Water activity in food processing and preservation", en **Drying Technologies in Food Processing**, X. D. Chen y A. S. Mujumdar, eds., Singapur, Blackwell Publishing, 2008, pp. 55–89. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=yB-VhPpQxv0C&pg=PP1&hl=es&pg=PR3#v=onepage&q&f=false>.
 - [29] G. A. Collazos-Escobar, V. Hurtado-Cortés, A. F. Bahamón-Monje y N. Gutiérrez-Guzmán, "Mathematical modeling of water sorption isotherms in specialty coffee beans processed by wet and semidry postharvest methods", *Sci Rep.*, vol. 15, pp. 3898, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83702-y>.
 - [30] D. Kaur, A. A. Wani, D. S. Sogi y U. S. Shivhare, "Sorption isotherms and drying characteristics of tomato peel isolated from tomato pomace", *Drying Technol.*, vol. 24, nro. 11, pp. 1515–1520, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373930600961371>.
 - [31] E. C. López, M. Castillo, I. Pilatowsky, L. F. Santis y B. Castillo, "Moisture sorption isotherms, isosteric heat, and Gibbs free energy of stevia leaves", *J. Food Process Preserv.*, vol. 45, nro. 1, pp. 1–30, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.15016>.
 - [32] B. K. Koua, P. M. E. Koffi, P. Gbaha y S. Toure, "Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*)", *J. Food Sci. Technol.*, vol. 51, nro. 9, pp. 1711–1723, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0687-y>.
 - [33] R. Fakhfakh, D. Mihoubi y N. Kechaou, "Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of bovine leather", *Heat Mass Transfer*, vol. 54, nro. 4, pp. 1163–1176, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2223-0>.
 - [34] E. A. Sánchez, B. Abril, J. Benedito, J. Bon y J. V. García, "Water desorption isotherms of pork liver and thermodynamic properties", *Food Sci. Technol.*, vol. 149, nro. 111857, pp. 1–10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111857>.
 - [35] J. A. Camaño, A. M. Rivera y J. E. Zapata, "Sorption isotherms and thermodynamic properties of the dry silage of red tilapia viscera (*Oreochromis* spp.) obtained in a direct solar dryer", *Helvion*, vol. 7, nro. 4, e06798, pp. 1–8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.helivion.2021.e06798>.
 - [36] S. Arslan, "Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds", *Food Sci. Technol.*, vol. 119, nro. 108859, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108859>.
 - [37] K. Fan, L. Chen, X. Wei, J. He y F. Yan, "Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of *Auricularia auricula*", *J. Food Process Preserv.*, vol. 39, nro. 6, pp. 1534–1541, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12379>.
 - [38] Z. Aksu y S. Tezer, "Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*", *Process Biochem.*, vol. 40, nro. 3–4, pp. 1347–1361, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.06.007>.
 - [39] A. N. Ebelegi, N. Ayawei y D. Wankasi, "Interpretation of adsorption thermodynamics and kinetics", *Open Phys. Chem. J.*, vol. 10, nro. 3, pp. 166–182, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojpc.2020.103010>.
 - [40] N. A. Aviara, "Moisture sorption isotherms and isotherm model performance evaluation for food and agricultural products", en *Sorption in 2020s*, G. Kyzas y N. Lazaridis, eds., IntechOpen, 2020, pp. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.87996>.
 - [41] A. Chuma, T. Ogawa, T. Kobayashi y S. Adachi, "Moisture sorption isotherm of durum wheat flour", *Food Sci. Technol. Res.*, vol. 18, nro. 5, pp. 617–622, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3136/fstr.18.617>.
 - [42] N. Abdenouri, A. Idlimam y M. Kouhila, "Sorption isotherms and thermodynamic properties of powdered milk", *Chem. Eng. Commun.*, vol. 197, nro. 8, pp. 1109–1125, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/00986440903412936>.
 - [43] M. Peleg, "Models of sigmoid equilibrium moisture sorption isotherms with and without the monolayer hypothesis", *Food Eng. Rev.*, vol. 12, nro. 1, pp. 1–13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09207-x>.
 - [44] M. S. Hasan, "Effect of storage temperature and periods on some characteristics of wheat flour quality", *Food Nutr. Sci.*, vol. 6, pp. 1148–1159, 2015. DOI: <http://doi.org/10.4236/fns.2015.612120>.
 - [45] L. Pantoja-Tirado, G. Prieto-Rosales y E. Aguirre, "Caracterización de la harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y la harina de tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) para su industrialización", *Rev. Tayacaja*, vol. 3, nro. 1, pp. 76–83, 2020. DOI: <https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.72>.
 - [46] R. Moreira, F. Chenlo, M. J. Vázquez y P. Cameán, "Sorption isotherms of turnip top leaves and stems in the temperature range from 298 to 328 K", *J. Food Eng.*, vol. 71, nro. 2, pp. 193–199, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.10.033>.
 - [47] S. Oh, E. J. Lee y G. P. Hong, "Quality characteristics and moisture sorption isotherm of three varieties of dried sweet potato manufactured by hot air semi-drying followed by hot-pressing", *Food Sci. Technol.*, vol. 94, pp. 73–78, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.044>.
 - [48] S. Brunauer, L. S. Deming, W. E. Deming y E. Teller, "On a theory of the van der Waals adsorption of gases", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 62, nro. 7, pp. 1723–1732, 1940. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja01864a025>.
 - [49] M. A. Dushkova, A. T. Simitchiev, H. R. Kalaydzhev, P. Ivanova, N. D. Menkov y V. I. Chalova, "Comparison and modeling of moisture sorption isotherms of deproteinized rapeseed meal and model extrudate", *J. Food Process Preserv.*, vol. 46, nro. 11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.16978>.
 - [50] A. Koç y M. Erbaş, "Investigation of sorption isotherms of wheat germ for its effect on lipid oxidation", *J. Food Sci.*, vol. 87, nro. 5, pp. 2072–2082, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16133>.
 - [51] S. Mallek, N. Bahloul y N. Kechaou, "Mathematical modelling of water sorption isotherms and thermodynamic properties of *Cucumis melo* L. seeds", *Food Sci. Technol.*, vol. 131, nro. 109727, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109727>.
 - [52] Y. Sato, Y. Wada y A. Higo, "Relationship between monolayer and multilayer water contents, and involvement in gelatinization of baked starch products", *J. Food Eng.*, vol. 96, nro. 2, pp. 172–178, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.07.009>.
 - [53] R. Silvestre, J. Espinosa, E. Heredia, E. Pérez y S. O. Serna, "Biocatalytic degradation of proteins and starch of extruded whole chickpea flours", *Food Bioprocess Technol.*, vol. 13, nro. 10, pp. 1703–1716, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02511-z>.
 - [54] R. Silvestre, J. Espinosa, E. Pérez y S. O. Serna, "Extruded chickpea flour sequentially treated with alcalase and α -amylase produces dry instant beverage powders with enhanced yield and nutritional properties", *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 56, nro. 10, pp. 5178–5189, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15199>.
 - [55] S. Wang, V. Chelikani y L. Serventi, "Evaluation of chickpea as alternative to soy in plant-based beverages, fresh and fer-

- mented", *Food Sci. Technol.*, vol. 97, pp. 570–572, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.067>.
- [56] T. Sigüenza, V. Pando, M. Gómez y J. M. Rodríguez, "Optimization of a simultaneous enzymatic hydrolysis to obtain a high-glucose slurry from bread waste", *Foods*, vol. 11, pp. 1–13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11121793>.
- [57] J. Jaimez, E. Contreras, F. González, L. G. González, J. E. Onofre y J. Ramírez, "Caracterización física y química de Zingiber officinale en diferentes estados de maduración para su uso potencial en la elaboración de bebidas saludables", *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 9, nro. 17, pp. 82–87, 2021. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7153>.
- [58] A. Lovegrove et al., "The contribution of fiber components to water absorption of wheat grown in the UK", *Cereal Chem.*, vol. 97, nro. 5, pp. 940–948, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/cche.10316>.
- [59] J. Ahmed, A. S. Almusallam, F. Al-Salman, M. H. AbdulRahman y E. Al-Salem, "Rheological properties of water insoluble date fiber incorporated wheat flour dough", *Food Sci. Technol.*, vol. 51, nro. 2, pp. 409–416, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.018>.
- [60] L. Acurio, D. Salazar, M. E. García, P. García-Segovia, J. Martínez-Monzó y M. Igual, "Characterization, mathematical modeling of moisture sorption isotherms and bioactive compounds of Andean root flours", *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 8, pp. 100752, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100752>.
- [61] M. N. Cahyanti, M. N. Alfiah y S. Hartini, "Sorption isotherm modelling of fermented cassava flour by red yeast rice", *Mater. Sci. Eng.*, vol. 349, pp. 012038, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/349/1/012038>.
- [62] G. H. de Oliveira, P. C. Corrêa, A. P. de Oliveira, R. C. dos Reis y I. A. Devilla, "Application of GAB model for water desorption isotherms and thermodynamic analysis of sugar beet seeds", *J. Food Process Eng.*, vol. 40, nro. 1, pp. 1–8, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12278>.
- [63] P. Yogendrarajah, S. Samapundo, F. Devlieghere, S. De Saeger y B. de Meulenaer, "Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of whole black peppercorns (*Piper nigrum* L.)", *Food Sci. Technol.*, vol. 64, nro. 1, pp. 177–188, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.045>.
- [64] J. Perdomo, A. Cova, A. J. Sandoval, L. García, E. Laredo y A. J. Müller, "Glass transition temperatures and water sorption isotherms of cassava starch", *Carbohydr Polym.*, vol. 76, nro. 2, pp. 305–313, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.10.023>.
- [65] S. Samapundo, F. Devlieghere, B. Meulenaer, A. Atukwase, Y. Lamboni y J. M. Debevere, "Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn", *J. Food Eng.*, vol. 79, nro. 1, pp. 168–175, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.040>.
- [66] S. S. Kirn y S. R. Bhowmik, "Moisture sorption isotherms of concentrated yogurt and microwave vacuum dried yogurt powder", *J. Food Eng.*, vol. 21, nro. 2, pp. 157–175, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90184-8](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90184-8).
- [67] J. Blahovec y S. Yanniotis, "GAB generalized equation for sorption phenomena", *Food Bioprocess Technol.*, vol. 1, nro. 1, pp. 82–90, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0012-3>.
- [68] E. O. Timmermann, J. Chirife y H. A. Iglesias, "Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?", *J. Food Eng.*, vol. 48, nro. 1, pp. 19–31, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00139-4).
- [69] P. P. Lewicki, "The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms", *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 32, nro. 6, pp. 553–557, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb02131.x>.
- [70] O. J. Oyelade, T. Y. Tunde, J. C. Igbeka, M. O. Oke y O. Y. Raji, "Modelling moisture sorption isotherms for maize flour", *J. Stored Prod. Res.*, vol. 44, nro. 2, pp. 179–185, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2007.10.005>.
- [71] E. Duggan, N. Noronha, E. D. O'Riordan y M. O'Sullivan, "Effect of resistant starch on the water binding properties of imitation cheese", *J. Food Eng.*, vol. 84, nro. 1, pp. 108–115, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.028>.
- [72] J. Chirife, E. O. Timmermann, H. A. Iglesias y R. Boquet, "Some features of the parameter k of the GAB equation as applied to sorption isotherms of selected food materials", *J. Food Eng.*, vol. 15, nro. 1, pp. 75–82, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(92\)90041-4](https://doi.org/10.1016/0260-8774(92)90041-4).
- [73] S. Arslan, "Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of quinoa grains", *Heat Mass Transfer.*, vol. 57, nro. 3, pp. 543–550, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02978-8>.
- [74] R. Moreira, F. Chenlo, M. D. Torres y D. M. Prieto, "Water adsorption and desorption isotherms of chestnut and wheat flours", *Ind. Crops Prod.*, vol. 32, nro. 3, pp. 252–257, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.04.021>.
- [75] D. Choque et al., "Storage conditions and adsorption thermodynamic properties for purple corn", *Foods*, vol. 11, nro. 828, pp. 1–12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11060828>.
- [76] W. A. M. McMinn y T. R. A. Magee, "Thermodynamic properties of moisture sorption of potato", *J. Food Eng.*, vol. 60, nro. 2, pp. 157–165, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00036-0).
- [77] L. Peixoto, C. C. Ferrari, D. Ito, E. de C. Guerreiro y S. P. Marconi, "Drum drying process of jabuticaba pulp using corn starch as an additive", *Braz. J. Food Technol.*, vol. 23, pp. e2019166, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.16619>.
- [78] H. Togrul y N. Arslan, "Moisture sorption behaviour and thermodynamic characteristics of rice stored in a chamber under controlled humidity", *Biosyst. Eng.*, vol. 95, nro. 2, pp. 181–195, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.06.011>.
- [79] P. O. Ngoddy y F. W. Bakker, "A generalized theory of sorption phenomena in biological materials (Part I. The isotherm equation)", *Transactions of the ASAE*, vol. 13, nro. 5, pp. 612–617, 1970. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.38675>.
- [80] S. Bellagha, A. Sahli y A. Farhat, "Desorption isotherms and isosteric heat of three tunisian date cultivars", *Food Bioprocess Technol.*, vol. 1, nro. 3, pp. 270–275, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0006-1>.
- [81] F. Chen, C. Zhou, G. Li y F. Peng, "Thermodynamics and kinetics of glyphosate adsorption on resin D301", *Arabian J. Chem.*, vol. 9, nro. 2, pp. S1665–S1669, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.04.014>.

Citación del artículo:

R. M. Vegas Niño, L. Marceliano Sánchez, J. V. Polo Quispe y F. A. García Polo, "Propiedades de adsorción de humedad y características termodinámicas de harina de tocosh de papa hidrolizada y harina de jengibre", *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 54, nro. 1, pp. 17–28, 2025. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v54n1.113962>.