UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE ALIMENTOS

Tema: Modelado de las isotermas de adsorción de agua de harinas obtenidas a partir de residuos de coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) sometidos a diferentes pretratamientos.

Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo la obtención del Título de Ingeniero en Alimentos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autor: Jorge Luis Sampedro Iza

Tutor: Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos

Ambato - Ecuador

Julio – 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final del Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 23 de Junio de 2025



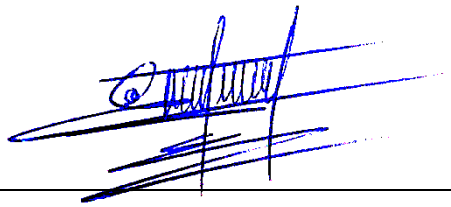
Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos

1804067088

TUTORA

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Luis Sampedro Iza, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Alimentos son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Jorge Luis Sampedro Iza

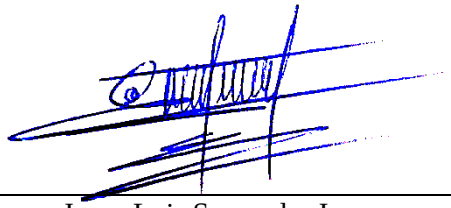
0550630123

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Informe Final del Trabajo de Titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final del Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.



Jorge Luis Sampedro Iza

0550630123

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

Firmado electrónicamente por:
DOLORES DEL ROCIO ROBALINO MARTINEZ
Validar únicamente con FirmaEC

Presidente del Tribunal

Firmado electrónicamente por:
MARIA EUGENIA GARCIA PAZMINO
Validar únicamente con FirmaEC

Mg. María Eugenia García Pazmiño
2100248505

Firmado electrónicamente por:
JUAN DE DIOS ESPINOZA MOYA
Validar únicamente con FirmaEC

Mg. Juan de Dios Espinoza Moya
1803201431

Ambato, 23 de Junio de 2025

DEDICATORIA

A mi Dios, quién ha sido mi guía y fortaleza en todo el trayecto de mi vida. "Ha guiado mi camino, sin importar los errores que haya cometido". Su amor y bendiciones han sido mi mayor fuente de inspiración, dedicación, motivación y fe. ***¡Con Dios todo es posible! ¡El tiempo de Dios es perfecto!***

A mis padres, María Esther Iza y Luis Alberto Sampedro, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, su apoyo, su ejemplo, y su amor lo llevaré en mi corazón. Su sacrificio de impulsarme a ser mejor día tras día no ha sido ni será en vano, gracias por creer y depositar su confianza en mí. Su esfuerzo constante y perseverante es reflejado en este trabajo, así como los demás logros que he alcanzado, mil gracias por apoyarme en cada meta que me he propuesto. ***¡Los quiero un montón! ¡No sé qué sería de mí, sin ustedes!***

A mis hermanas, Silvia y Deysi, por estar conmigo en cada momento, por escucharme, aconsejarme y apoyarme en todas mis decisiones y locuras de la vida. Gracias por estar ahí, por sacarme una sonrisa en mis momentos más difíciles, su confianza, su preocupación y amor hacia mí, siempre lo llevaré conmigo ***¡Las quiero un montón!***

A mi padrino, Luis Adolfo Iza, por ser un gran ejemplo para enfrentar las adversidades de la vida y continuar las duras travesías. Su apoyo tanto moral como económicamente, ha sido un voto de confianza, en qué lograré cada objetivo planteado en mi vida. Un millón de gracias por creer en mí. Siempre llevaré su frase en mi mente ***¡Lo más bonito de la vida sucederá cuando estás a punto de perder las esperanzas!***

A una persona en especial (Mónica Adriana Masapanta) que ha estado conmigo en cada momento, dándome ánimos en momentos difíciles. Cada mensaje por chat ha sido un aliento más, que me ha hecho sentir que puedo contar contigo. ***¡Gracias por ser una excelente persona, nunca cambies!***

A mi Familia Sampedro e Iza, quiénes han caminado conmigo en cada trayecto de esta vida maravillosa, son el mejor regalo que Dios me ha bendecido. Tenerlos a todos presentes compartiendo una misma mesa, llena de sonrisas, experiencias, celebraciones, son momentos únicos e irrepetibles. ***¡Lo más importante en esta vida, siempre serán ustedes, mi familia hermosa!***

A mis mascotas fieles y leales que me han acompañado a cada parte que he caminado. Siento sus buenas vibras cuando se acercan a mí, su amor incondicional, su alegría cuando llegaba a la casa y su compañía cuando me dirigía a los invernaderos, nunca será olvidado.

¡GRACIAS TOTALES, esto no sería posible sin ustedes!

<<La humidad siempre prevalecerá>>

AGRADECIMIENTO

A mi Dios, quién me ha brindado la sabiduría y fortaleza necesaria para alcanzar esta etapa en mi vida. ***¡Sé que tienes un propósito para mi vida!***

A mis padres, quiénes se esforzaron día tras día para que no me falte nada en este trayecto universitario y así culminarla con éxito. Nunca olvidaré cuando me decían: ***"Quiero que tu seas un gran profesional, ya que nosotros no tuvimos ese apoyo necesario".***

A mi madre, por ser una gran luchadora sin límite alguno, a pesar de los dolores de espalda, usted me brindó lo mejor. Mil gracias, por esas llamadas constantes de preocupación en mis etapas iniciales de la carrera cuando era foráneo y esos cafecitos de desayuno antes de irme a la universidad cuando regresé a culminar este tramo junto a ustedes.

A mi padre, por guiarme y corregirme con ese carácter fuerte, que ahora lo veo de una perspectiva diferente, que no fue porque era malo, sino que usted me estaba preparando para enfrentar los duros desafíos de la vida. Por decirme: ***"Hazlo, es por bien tuyo mismo, no es para mí".***

Mi gratitud entera, a la Universidad Técnica de Ambato, especialmente a la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología (FCIAB), por abrirme sus puertas para mi formación académica, tanto emocional como profesional.

Con un profundo agradecimiento sincero a mi tutora Mg. Liliana Acurio por brindarme la oportunidad de ser su tutorado y extenderme la mano cuando más lo necesitaba. Su apoyo, paciencia y orientación para aclarar cada una de mis dudas fueron fundamentales en cada proceso de esta investigación.

A todos mis amigos, compañeros y colegas, quiénes formaron parte de este trayecto universitario que ha sido largo y a la vez bonito, con buenas experiencias y conocimientos compartidos dentro de una misma aula de clases.

"No sé cómo terminará mi historia, pero en mis páginas jamás leerás que me rendí"

<<TODO FUE POSIBLE>>

¡Con gratitud a todos, mis más sinceros agradecimientos!

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR ii

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii

DERECHOS DE AUTOR iv

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO v

DEDICATORIA vi

AGRADECIMIENTO vii

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS viii

ÍNDICE DE TABLAS xi

ÍNDICE DE FIGURAS xii

RESUMEN EJECUTIVO xiii

ABSTRACT xiv

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO 1

1.1. Antecedentes investigativos 1

1.1.1. Planteamiento del Problema y Justificación 1

1.1.2. Fundamentación Teórica 2

1.1.2.1. Coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) 2

1.1.2.1.1. Origen 2

1.1.2.1.2. Descripción 2

1.1.2.1.3. Variedades 3

1.1.2.1.4. Composición Nutricional 3

1.1.2.2. Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) 4

1.1.2.2.1. Origen 4

1.1.2.2.2. Descripción 4

1.1.2.2.3. Variedades 5

1.1.2.2.4. Composición Nutricional 5

1.1.2.3. Tratamientos previos al secado 6

1.1.2.3.1. Agua en Ebullición 6

1.1.2.3.2. Microondas 7

1.1.2.3.3. Vapor 7
1.1.2.4. Secado 7
1.1.2.4.1. Condiciones de secado 8
1.1.2.5. Isotermas de adsorción 8
1.1.2.5.1. Tipos de isotermas 9
1.1.2.6. Modelos matemáticos de ajuste de las isotermas de adsorción 10
1.1.2.6.1. Modelo matemático GAB 10
1.1.2.6.2. Modelo matemático BET 10
1.2. Objetivos 11
1.2.1. Objetivo General 11
1.2.2. Objetivos Específicos 11
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA 12
2.1. Materiales 12
2.2. Métodos 13
2.2.1. Construir las isotermas de adsorción de agua de las harinas obtenidas a partir de residuos de coliflor y brócoli, utilizando soluciones salinas saturadas como factores higroscópicos. 13
2.2.1.1. Materia Prima 13
2.2.1.2. Tratamientos Previos 13
2.2.1.2.1. Control 13
2.2.1.2.2. Cocción en Agua 13
2.2.1.2.3. Cocción en Microondas 13
2.2.1.2.4. Cocción en Vapor 14
2.2.1.3. Secado y Elaboración de Harinas 14
2.2.1.4. Isoterma de Absorción 14
2.2.1.5. Cálculo de la Humedad de Equilibrio 14
2.2.2. Correlacionar los datos de la isoterma de adsorción con modelos matemáticos referenciales 15
2.2.2.1. Modelado de las Isotermas de Adsorción 15
2.2.2.2. Análisis Estadístico 15
2.2.3. Evaluar el efecto de los diferentes pre-tratamientos en las isotermas de adsorción de las harinas obtenidas 16
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN 17
3.1. Análisis y discusión de resultados 17
3.1.1. Isotermas de Adsorción 17
3.1.1.1. Harina de Coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) 17
3.1.1.2. Harina de Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) 21

3.1.2. Modelado matemático de las isotermas de sorción 25
3.1.2.1. Análisis de los modelos GAB y BET para harina de coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) 25
3.1.2.2. Análisis de los modelos GAB y BET para harina de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) 26
3.1.3. Evaluación del efecto de los diferentes pre-tratamientos en las isotermas de adsorción 28
3.1.3.1. Análisis de los parámetros GAB y BET en las harinas de coliflor 28
3.1.3.2. Análisis de los parámetros GAB y BET en las harinas de brócoli 30
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 32
4.1. Conclusiones 32
4.2. Recomendaciones 33
BIBLIOGRAFÍA 34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Composición nutricional de la verdura crucífera (Coliflor)* 4

Tabla 2 *Composición nutricional de la verdura crucífera (Brócoli)* 6

Tabla 3 *Recursos materiales que se utilizaron para el desarrollo del proyecto* 12

Tabla 4 *Sales saturadas que se utilizaron como factores higroscópicos y sus actividades de agua* 14

Tabla 5 *Ecuaciones que se emplearon para el modelado de las isotermas de adsorción* 15

Tabla 6 *Parámetros estadísticos que se aplicaron para el análisis de los modelos antes descritos* 16

Tabla 7 *Variables que se consideraron para evaluar el efecto de los diferentes pre-tratamientos* 16

Tabla 8 *Cambios físicos observados en las harinas de coliflor que fueron expuestas a diferentes HR* 20

Tabla 9 *Cambios físicos observados en las harinas de brócoli que fueron expuestas a diferentes HR* 24

Tabla 10 *Parámetros obtenidos en el modelado de isotermas de adsorción en harinas de coliflor* 25

Tabla 11 *Parámetros obtenidos en el modelado de isotermas de adsorción en harinas de brócoli* 26

Tabla 12 *Análisis de la humedad en monocapa de la harina de coliflor* 28

Tabla 13 *Análisis de la constante de calor de sorción de la harina de coliflor* 28

Tabla 14 *Análisis del factor de corrección de la harina de coliflor* 29

Tabla 15 *Análisis de la humedad en monocapa de la harina de brócoli* 30

Tabla 16 *Análisis de la constante de calor de sorción de la harina de brócoli* 30

Tabla 17 *Análisis del factor de corrección de la harina de brócoli* 30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Planta de coliflor (Brassica oleracea var. botrytis L.)* 2

Figura 2 *Descripción de las partes de la coliflor (Brassica oleracea var. botrytis L.)* 3

Figura 3 *Tipos de variedades de la coliflor (Brassica oleracea var. botrytis L.)* 3

Figura 4 *Planta del brócoli (Brassica oleracea var. italica Plenck).* 4

Figura 5 *Descripción de las partes del brócoli (Brassica oleracea var. italica Plenck)* 5

Figura 6 *Tipos de variedades del brócoli (Brassica oleracea var. italica Plenck)* 5

Figura 7 *Principios de una isoterma de adsorción* 8

Figura 8 *Clasificación para las isotermas de adsorción de gases y vapores sobre sólidos* 9

Figura 9 *Isotermas de adsorción de harinas de coliflor sometidas a diferentes pretratamientos* .. 17

Figura 10 *Curvas experimentales de las isotermas de adsorción de las harinas obtenidas a partir de residuos de coliflor* 19

Figura 11 *Isotermas de adsorción de harinas de brócoli sometidas a diferentes pretratamientos* .. 21

Figura 12 *Curvas experimentales de las isotermas de adsorción de las harinas obtenidas a partir de residuos de brócoli* 23

Figura 13 *Gráficos de medias a partir de los parámetros GAB y BET de las harinas obtenidas a partir de residuos de coliflor* 29

Figura 14 *Gráficos de medias a partir de los parámetros GAB y BET de las harinas obtenidas a partir de residuos de brócoli*..... 31

RESUMEN EJECUTIVO

En la actualidad, las personas persiguen adquirir una gama de alimentos funcionales que aporten nutrimentos y sustancias que produzcan efectos fisiológicos y metabólicos útiles, siendo la coliflor y brócoli, altamente apreciados y consumidos en la dieta humana. El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo construir isotermas de adsorción de agua de las harinas elaboradas con residuos de coliflor y brócoli mediante diferentes pretratamientos. Las muestras tanto de coliflor como brócoli fueron sometidas a precocción en agua, vapor y microondas, y se realizó un proceso de secado convectivo a 65 grados Celsius por ocho horas. Las harinas se colocaron en recipientes herméticos con soluciones salinas saturadas de humedad relativa controlada, hasta alcanzar un peso constante de 0,0005 gramos. Se analizó la vida útil y la estabilidad de las harinas por medio de la construcción de isotermas de adsorción de agua, que presentaron curvas sigmoidales de tipo II, por su naturaleza macroporosa de sitios polares activos y carácter hidrófobo, representado una humedad de equilibrio entre 0,15 a 0,35 kg agua por kg sólido seco, a humedades relativas superiores al 60 por ciento. Los datos experimentales se ajustaron a los modelos GAB y BET, corroborando una energía fuerte para la adhesión de moléculas de agua en la monocapa. El coeficiente de determinación en el modelo de BET presentó un mejor ajuste por sus valores de aproximación. En definitiva, tanto la humedad de la monocapa como las constantes de sorción son afectadas significativamente por los pretratamientos.

Palabras clave: Secado convectivo, crucíferas, isotermas de adsorción, humedades relativas, modelos matemáticos, estabilidad, vida útil.

ABSTRACT

Nowadays, people seek to acquire a range of functional foods that provide nutrients and substances that produce beneficial physiological and metabolic effects, with cauliflower and broccoli being highly valued and consumed in the human diet. This research aims to construct water adsorption isotherms by valorizing and transforming cruciferous vegetable waste into flour and fitting their experimental data into mathematical models, evaluating the effect of pretreatments. Samples of both cauliflower and broccoli were precooked in water, steam, and microwaves, and convectively dried at 65 degrees Celsius for eight hours. They were placed in airtight containers with saturated saline solutions at controlled relative humidity until a constant weight of 0.0005 grams was achieved. The shelf life and stability of the flours were analyzed by constructing water adsorption isotherms, which presented type II sigmoidal curves due to their macroporous nature of active polar sites and hydrophobic character, representing an equilibrium moisture content of 0.15 to 0.35 kg water per-kg dry solids, at relative humidities above 60 percent. The experimental data were fitted to the GAB and BET models, corroborating a strong energy for the adhesion of water molecules in the monolayer. The coefficient of determination in the BET model presents a better fit due to its approximation values. Ultimately, both monolayer moisture and sorption constants are significantly affected by the treatments.

Keywords: Convective drying, cruciferous vegetables, adsorption isotherms, relative humidity, mathematical models, stability, shelf life.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes investigativos

1.1.1. Planteamiento del Problema y Justificación

En la actualidad, la mayoría de las personas buscan una relación estrecha entre su salud y su dieta, por lo que persiguen adquirir una diversa gama de alimentos funcionales que aporten nutrimentos y sustancias capaces de producir efectos fisiológicos y metabólicos útiles, para mantener una condición buena tanto en salud física, como mental **(Vasquez et al., 2020)**. Dentro de los alimentos que han repuntado su consumo se encuentra el brócoli y coliflor, que son altamente apreciados y consumidos con bastante regularidad en la dieta humana, debido a que son verduras crucíferas que presentan carbohidratos, fibra dietética, proteínas, minerales, vitaminas y compuestos bioactivos importantes **(Shinali et al., 2024)**.

Durante las diferentes etapas de gestión de la cadena de suministro de hortalizas, desde el cultivo de la materia prima hasta el consumidor, las verduras crucíferas (brócoli y coliflor) generan desechos y subproductos de procesamiento de un valor bajo en forma de podredumbre, peciolos, tallos y hojas en todo el mundo **(Shinali et al., 2024)**. Se estima que de cada planta en el campo se aprovecha solo la inflorescencia que constituye un aproximado del 30% de su peso total, y el restante que consiste en tallos y hojas verdes que representa un 70% son considerados generalmente como residuos agrícolas **(Vasquez et al., 2020)**. Por ende, la generación de cantidades considerables de desechos tiene un enorme impacto en los aspectos económicos y medioambientales. Sin embargo, estos subproductos que son considerandos residuos de poco valor contienen compuestos o nutrientes que pueden ser reutilizados o transformados para aumentar su utilidad y su valor económico.

Por medio de la valorización y transformación de los residuos de brócoli y coliflor en harinas, se pretende aumentar su vida útil en el almacenamiento sin que sus características nutricionales se vean alteradas. Estas harinas obtenidas pueden ser aplicadas en distintas gamas de formulaciones alimentarias, como: galletas, panificados, mezclas para sopas, pastas y suplementos nutricionales. Además, que la producción de harinas a partir de residuos de crucíferas resulta interesante, tanto por su contenido nutricional y sus propiedades funcionales, como por su capacidad de absorber y retener agua.

Por otro lado, **Cezar et al. (2021),** destacan la importancia de la determinación de las isotermas de absorción, que no solo permiten comprender cómo interactúa el alimento (absorbe o libera agua en función de la humedad relativa del medio), sino que también evalúa cómo el contenido de humedad influye en su estabilidad (fisicoquímica, microbiológica y sensorial) de almacenamiento y su vida útil. Asimismo, la aplicación de los diferentes pretratamientos (cocción, vapor, microondas), permitirá definir el pre-tratamiento que presenta estabilidad, calidad y seguridad de la harina para optimizar su uso en aplicaciones alimentarias.

1.1.2. Fundamentación Teórica

1.1.2.1. Coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.)

1.1.2.1.1. Origen

La coliflor es una verdura originaria del Mediterráneo oriental, de las regiones que se conocen en la actualidad como Líbano y Siria. Esta planta pertenece a la familia *Brassicaceae* y a las variedades de *Brassica oleracea*, que se producen a partir de las semillas **(Ross, 2024)**. Actualmente esta hortaliza se cultiva en todo el mundo bajo diferentes condiciones climáticas y durante casi todo el año, pero la temporada perfecta para su cultivo es entre el mes de septiembre e inicios de enero **(Díaz-Pérez et al., 2024)**. Además, pertenece a la familia de las crucíferas, que cuentan con aproximadamente 3000 especies que se pueden encontrar en el hemisferio norte en zonas templadas o frías **(Mudry & Jackler, 2021)**.

1.1.2.1.2. Descripción

Es una planta con inflorescencia hipertrofiada (desarrollada de manera desproporcionada), formando una masa de peciolos o botones compactos. Su parte comestible es la flor que forma una pella (Figura 1), es decir, una agrupación de flores carnosas, varias de ellas se encuentran incompletamente desarrolladas de distinto color según sus variedades, blanco amarillo o verde **(Illescas et al., 2008)**.

Figura 1

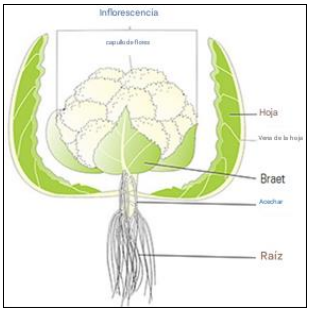
Planta de coliflor (Brassica oleracea var. botrytis L.)



Presenta un meristemo de la inflorescencia que genera de manera constante una réplica de sí mismo en una espiral de sus flancos. Cada nuevo meristemo puede producir continuamente hasta generar un décimo orden de ramificación y más, lo que genera un conjunto compacto y geométrico de meristemos de inflorescencia indiferenciados que tiene una textura y forma muy novedosa (Figura 2). Su inflorescencia tiene una forma redondeada, carnosa y de gran tamaño, que puede alcanzar un diámetro de 30 cm y llegar a pesar más de 2 kilogramos **(Mudry & Jackler, 2021)**.

Figura 2

Descripción de las partes de la coliflor (Brassica oleracea var. botrytis L.)



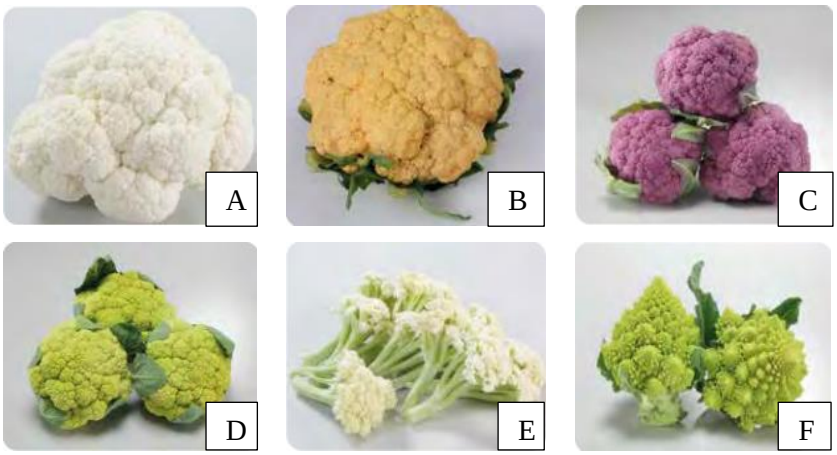
Fuente: (Fiorin et al., 2022).

1.1.2.1.3. Variedades

Existen dos tipos de coliflor que se clasifican: la india y la europea. La primera se adapta perfectamente a la humedad y al calor, lo que madura con mayor rapidez; mientras que la segunda crece en climas fríos. Considerando que la coliflor blanca es la más común, pero como se observa hay naranjas, verdes y moradas (Figura 3) **(Kobayashi et al., 2023)**.

Figura 3

Tipos de variedades de la coliflor (Brassica oleracea var. botrytis L.)



Nota. (A) Nozuki. Es blanquísima; (B) Coliflor naranja; (C) Akamaru Domo; (D) Kougyoku; (E) Yukihanabi; (F) Artist. El brócoli romanesco. Fuente: **(Kobayashi et al., 2023)**.

1.1.2.1.4. Composición Nutricional

La coliflor contiene un alto valor nutricional debido a la presencia de altos niveles de compuestos antioxidantes, vitaminas, glucosinolatos, compuestos fenólicos y carotenoides que ejercen un efecto beneficioso sobre nuestra salud **(Picchi et al., 2020)**. Por otro lado, **Uher et al. (2017)**, detallan que presenta una alta proporción de agua (91%), azúcar (4,5%), proteína (2,5%), fibra cruda (1,8%), y es baja en grasas (0,3%), lo que implica un alimento de bajo contenido energético.

Los minerales que están presentes significativamente son: calcio, fósforo, potasio, sodio, magnesio, hierro y azufre. En relación con la presencia de vitaminas se destaca, la vitamina C, que proporciona protección contra el cáncer, ayuda a reducir el colesterol en sangre y sirve como antioxidante. También, los folatos que contribuyen un funcionamiento normal del sistema inmunitario y aporta una formación natural de las células sanguíneas **(Valero et al., 2018)**.

Tabla 1

Composición nutricional de la verdura crucífera (Coliflor)

Nutrientes	**Coliflor (g/100g $_{crudo}$)**
Carbohidratos	4,97
Proteína	1,92
Lípidos	0,28
Fibra	2
Minerales	K: 0,299 Ca: 0, 022 P: 0,44

Fuente: (Ağagündüz et al., 2022).

1.1.2.2. Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck)

1.1.2.2.1. Origen

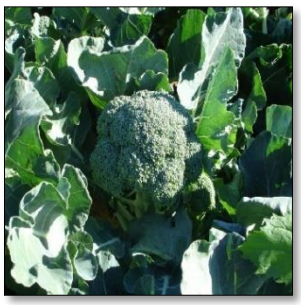
El brócoli pertenece a la misma familia que la coliflor, una planta crucífera (*Brassicaceae*). Su nombre proviene de Italia del término italiano "brocco" que significa retoño o brotes de col haciendo referencia a su capacidad de rebrotar después de ser cortado. Esta verdura es una variedad de tipo col silvestre que ha sido cultivada desde hace más de 2000 años. También, este alimento ha sido apreciado por los romanos, quienes lo introdujeron en su dieta y lo difundieron por el Mediterráneo **(Baenas et al., 2023)**.

1.1.2.2.2. Descripción

El Brócoli pertenece a la familia *Brassicaceae* que tiene hojas divididas y pecioladas. Presenta una cabeza principal que está formada por racimo de botones florales completamente desarrollados de color verde (Figura 4), que se encuentran organizados de manera más dispersa sobre sus tallos que son más largos y menos compactos **(Syed et al., 2023)**.

Figura 4

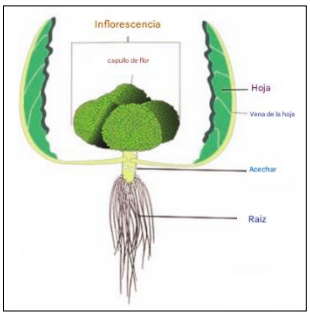
Planta del brócoli (Brassica oleracea var. italica Plenck).



Según **Siomos et al. (2022),** una planta bien erguida y ramificada alcanza un crecimiento entre 60 – 90 cm de altura y su inflorescencia llega a desarrollarse hasta 20 cm de diámetro, con un peso aproximado de 2 Kg. También, crece como una hierba anual que puede alcanzar los 400 mm de la fase vegetativa y aproximadamente 1-2 m al concluir su periodo de floración.

Figura 5

Descripción de las partes del brócoli (Brassica oleracea var. italica Plenck)



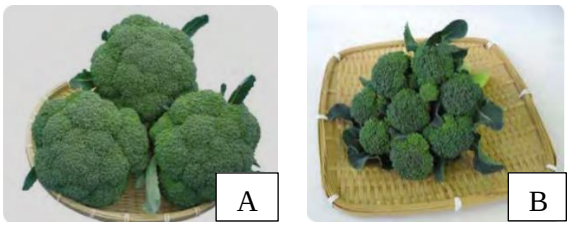
Fuente: **Fiorin et al. (2022)**.

1.1.2.2.3. Variedades

Las variedades del brécol suelen ser clasificadas por el ciclo de formación de la pella, divididas a desarrollo temprano cuando se cosechan menos de 90 días tras la simbra. Existe dos tipos de brócoli. El más común es el que posee una gran cabeza floral carnosa en la parte superior del tallo (A), que alcanza un diámetro entre 10 – 20 cm. El otro presenta pequeños brócolis de un color púrpura en la base de sus hojas, que son suaves, deliciosos y espesos (B) **(Kobayashi et al., 2023)**.

Figura 6

Tipos de variedades del brócoli (Brassica oleracea var. italica Plenck)



Nota. (A) Green Diamond. Se puede cosechar temprano; (B) Green Coral. Se cosecha el primer brócoli que nace, luego los pequeños que emergen de las yemas laterales. Fuente: **(Kobayashi et al., 2023).**

1.1.2.2.4. Composición Nutricional

El brócoli es una hortaliza climatérica muy perecedera, rica en minerales, carbohidratos, compuestos fenólicos, fibra dietética, glucosinolatos y antioxidantes **(Reyes et al., 2023)**. Es fuente de vitaminas como la C y K (Tabla 2) que contribuyen al funcionamiento de los músculos y del sistema nervioso.

Según **Valero et al. (2018)**, estima que una porción de 100 gramos de brócoli aporta 34 kcal y representa el 28% de la cantidad de folatos (vitamina B9) que una persona requiere consumir en su vida diaria, aportando la formación de células nuevas. También, es una fuente de antioxidantes (sulforafano), que ayuda a combatir el estrés oxidativo como una protección contra el cáncer **(Vélez & Álava, 2021)**.

Tabla 2

Composición nutricional de la verdura crucífera (Brócoli)

Nutrientes	**Brócoli (g/100g, crudo)**
Carbohidratos	6,27
Proteína	2,57
Lípidos	0,34
Fibra	2,4
Minerales	K: 0,303 Ca: 0, 046 P: 0,067

Fuente: **Ağagündüz et al. (2022)**.

1.1.2.3. Tratamientos previos al secado

Para que estas verduras sean sometidas a un proceso de secado, es esencial minimizar o prevenir la degradación de su calidad, ya que estos productos representan una gran cantidad de antioxidantes, compuestos bioactivos, fitoquímicos, minerales y vitaminas, relacionados a promover un bienestar saludable. Sin embargo, **Oliveira et al. (2016)** mencionan que, al ser expuestas directamente al secado, los fitoquímicos sufren una degradación significativa, así como también la pérdida de nutrientes que son inherentes a la deshidratación y sus cambios de color por la retención directa de nutrientes pigmentarios, como: clorofilas, carotenoides, flavonoides y fenoles.

El pretratamiento más preferido de las crucíferas es el escaldado, tanto en ebullición como en vapor, que ayudan a destruir las enzimas que lo deterioran, previniendo las reacciones de oxidación y evitando que se doren o desarrollen características sensoriales desagradables. Por ende, es importante someter a diferentes tratamientos térmicos los residuos de la coliflor y el brócoli, con el fin de mejorar la calidad de un producto o su eficiencia en el proceso **(Romero Ramírez, 2024)**.

1.1.2.3.1. Agua en Ebullición

Un estudio realizado por **González & Simón (2016)**, recomienda introducir los vegetales en agua hirviendo (100°C) por un tiempo intervalo de 5 – 10 minutos desde el reinicio de la ebullición. Este tratamiento normalmente genera una pérdida de compuestos antioxidantes, como el ácido ascórbico y los polifenoles, debido a una hidrólisis parcial. En otro aspecto, si las muestras son aplicadas en condiciones adecuadas, puede mejorar el sabor, la aceptabilidad, la textura y la calidad nutricional. Sin embargo, varios autores han descrito que el agua cercana a temperatura de ebullición es desfavorable con relación a reducciones significativas de los nutrientes, pero es eficaz en la destrucción de bacterias dañinas en comparación a un tratamiento a vapor **(Oliveira et al., 2016)**.

1.1.2.3.2. Microondas

Es un método que aplica ondas electromagnéticas de alta frecuencia para la generación de elevadas temperaturas en un sistema cerrado, ya sea para calentar, descongelar o cocer un alimento. Esto proceso ocurre a partir de una vibración y fricción de iones y moléculas de agua presentes en el alimento, considerando el tiempo y la potencia del tratamiento **(Jiménez Prieto, 2020)**. Por otro lado, **López Hernández (2017)** aplicó una potencia de 600 W en tiempos de cocción de 1, 3 y 5, lo cual, destacó un aumento significativo en la cantidad de polifenoles totales y su capacidad antioxidante, ya que, al ser hidrolizados por los compuestos conjugados, aumentan su disponibilidad para realizar su actividad.

1.1.2.3.3. Vapor

La cocción a vapor es un método benéfico que consiste en cocer el alimento por condensación y convección (transferencia de calor) por medio del agua en ebullición dependiendo de la presión atmosférica. Se destaca por preservar los nutrientes, el sabor, el aroma y la textura de las verduras, ya que no se exponen en contacto directo con el agua caliente. Es decir, las moléculas de vapor transmiten a los alimentos que están expuestos su energía de movimiento y evaporación **(Achón Tuñón et al., 2018)**. Además, este proceso ayuda que la fibra alimentaria resulte más digestiva, conservando la actividad antioxidante y el contenido de compuestos fenólicos, ya que no se disuelven ni se pierden durante este procedimiento **(Gutiérrez et al., 2019; López Hernández, 2017)**.

1.1.2.4. Secado

El secado es una de las operaciones unitarias más usuales en varias industrias alimentarias, que se basa en la reducción de la actividad de agua de los alimentos para evitar el deterioro microbiano y varias reacciones químicas involucradas. Existen diversas técnicas de secado, como el secado por liofilización, aire caliente y el método tradicional expuesta a la acción del calor solar. Además, es una etapa importante después de la cosecha, ya que permite preservar la calidad del alimento cultivado, prolongar su vida útil y minimizar las pérdidas durante su almacenamiento **(Vargas et al., 2022; Kendall et al., 2012)**.

Hay que considerar que un alimento correctamente secado dependerá de un calor suficiente para extraer la humedad, un aire seco que la absorbe con una circulación de un aire adecuado para eliminarla. Después, el contenido de agua presente en el alimento se reduce entre 5 – 25% **(Kendall et al., 2012)**. Según **Hameed et al. (2023)** el efecto de la temperatura y la velocidad del flujo de aire afecta de manera considerable la actividad antioxidante, los componentes bioactivos y la descomposición de los componentes nutricionales.

1.1.2.4.1. Condiciones de secado

La optimización de la temperatura de secado es esencial, ya que permitirá identificar el punto óptimo para la preservación de los valores nutricionales de la verdura **(Poojitha et al., 2022)**. El objetivo principal de esta investigación es transformar los residuos tanto de coliflor como brócoli en harinas y el análisis de ciertos parámetros, como: contenido de humedad y sus características de sorción. **Arslan & Alibaş (2024)** consideran que la eficiencia del secado y la calidad de un producto final dependerá de las condiciones del proceso, que se detallan a continuación:

- **Temperatura:** Es uno de los factores más críticos, si las muestras son expuestas a temperaturas altas provocará la degradación de los compuestos, como los antioxidantes y vitamina C. En cambio, a temperaturas entre 50 – 65°C alcanzan una excelente reducción del contenido de agua, sin comprometer su calidad nutricional.
- **Velocidad de aire:** Es la velocidad a la que se mueve el aire sobre el material que se está secando e influye en la tasa de secado, es decir, la humedad que se extrae en un tiempo determinado.
- **Humedad relativa:** Es la cantidad de vapor que se encuentra presente en el aire respecto a una cantidad máxima que puede retener a una temperatura determinada.

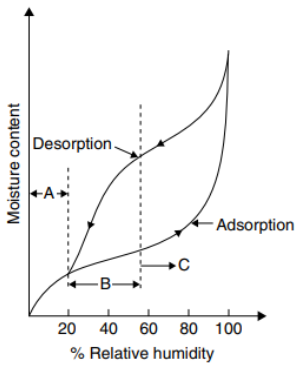
1.1.2.5. Isotermas de adsorción

La isoterma de adsorción representan la cinética con la que un alimento adsorbe humedad o se deshidrata; es decir, es una representación gráfica de cómo se comporta en función de la humedad relativa del ambiente. Además, permite predecir la estabilidad del alimento **(Badui Degal, 2006)**.

En la Figura 7 se representa una isoterma de sorción típica de productos alimenticios. Se observa que la curva se divide en tres regiones, una región A donde el agua está fuertemente unida al producto alimenticio. Una región B, en la que el agua está menos apretada y generalmente está presente en pequeños capilares. Y, una región C, que describe que el agua se retiene en capilares grandes, o está libre **(Heldman & Lund, 2006)**.

Figura 7

Principios de una isoterma de adsorción



Fuente: **Heldman & Lund (2006).**

1.1.2.5.1. Tipos de isotermas

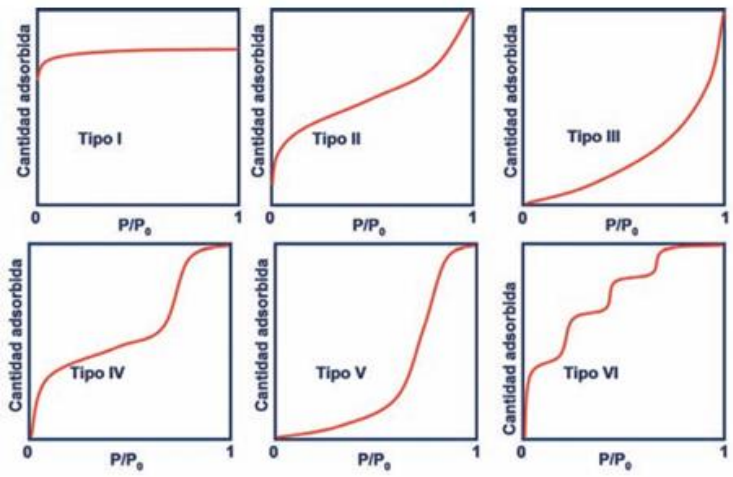
Según **Álvarez et al. (2014),** han propuesto diferentes clasificaciones de las isotermas de adsorción, pero la más aceptada es la propuesta por Brunauer, S., Deming, L., Deming, W. y Teller, E (1940), que diferenciaron 5 tipos de isotermas, aunque se incluyó la de tipo VI, como se ilustra en la Figura 8. En las isotermas para adsorbentes microporosos, el tamaño del poro no es mayor que el diámetro de la molécula de sorbato, produciendo una adsorción en monocapa y a presiones relativas bajas, son normalmente de tipo I **(Ruthven, 1985)**.

Las isotermas de tipo II y III normalmente se observan en adsorbentes que poseen una amplia gama de tamaños de poros. En sí, un tipo II se relaciona a procesos de adsorción en sólidos no porosos o macroporosos, siendo característico en el punto B, como un indicativo que se completa la monocapa. En cambio, la de tipo III su interacción es débil entre adsorbente - adsorbato, por lo que no se forma un codo ni se puede definir en el punto B **(Álvarez et al., 2014; Ruthven, 1985)**.

Es caracterizado por la presencia de ciclos de histéresis (diferencia entre adsorción - desorción), siendo semejante al tipo II, pero a presiones medias empieza la condensación capilar en mesoporos, conocida como tipo IV. Si los efectos de atracción intermolecular son grandes, se observa una isoterma tipo V donde la afinidad entre adsorbente – adsorbato es baja y su histéresis se enlaza con el llenado de los poros. Y, finalmente la isoterma de tipo VI es característica de una adsorción en multicapa sobre superficies altamente uniformes, es decir, las primeras capas se forman a medida que aumenta la presión **(Álvarez et al., 2014)**.

Figura 8

Clasificación para las isotermas de adsorción de gases y vapores sobre sólidos



Fuente: **Álvarez et al. (2014).**

1.1.2.6. Modelos matemáticos de ajuste de las isotermas de adsorción

Los modelos matemáticos son ecuaciones que permiten evaluar variables obtenidas a partir de un desarrollo experimental. De esta manera, la actividad de agua puede ser calculada por diversos modelos matemáticos, como: las ecuaciones de Langmuir, de BET y GAB, de Smith, de Henderson, entre otras **(Badui Degal, 2006)**. Mediante estas constantes que representa cada modelo, se pueden determinar propiedades termodinámicas como: el calor de sorción, la energía de activación, la entropía diferencial y la energía de Gibbs. Estas propiedades son fundamentales para calcular la energía que se requiere en un proceso, estudiar las propiedades de agua absorbida, evaluar la microestructura del alimento (granos) y los cambios que presentará un alimento en su exterior con el transcurso de un tiempo prolongado de almacenamiento **(Vargas & Quispe, 2023)**.

1.1.2.6.1. Modelo matemático GAB

Este modelo matemático, definido por **Anderson (1946)**, **de Boer (1953)**, y **Guggenheim (1966)**, es una ecuación que representa un número razonable de tres parámetros, y es aplicado para ajustar datos de sorción de productos alimenticios, hasta alcanzar una actividad de agua (a_w) menor o igual 0,9. Presenta una constante (K_{GAB}) que le otorga gran adaptabilidad, asumiendo que las moléculas en multicapas, tienen interacciones laterales con el adsorbente que son similares a las moléculas de la monocapa en relación a sus valores energéticos. Representa más del 50% de las isotermas de carnes, frutas y vegetales **(Abdullah et al., 2020;)**.

1.1.2.6.2. Modelo matemático BET

Este modelo BET fue desarrollado por **Brunauer, Emmett, y Teller (1938)**. Es una ecuación que se emplea para la estimación de una cantidad de agua que se fusiona a los sitios polares de los alimentos deshidratados. Asume que la adsorción física sucede en multicapas sobre una superficie sólida, pero ignora interacciones laterales, es decir, no considera atracciones o fuerzas entre las moléculas absorbidas. Además, es fundamental para la interpretación de las capas de isotermas de adsorción de tipo II y III, considerando que proporciona un buen ajuste para una variedad de alimentos a valores de actividad de agua (a_w) en un rango de 0,05 – 0,45 **(Abdullah et al., 2020; Ihuaraqui & Bardales, 2023)**.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Modelar las isotermas de adsorción de agua de harinas obtenidas a partir de residuos de coliflor (*Brassica oleracea* var. b*otrytis* L.) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) sometidos a diferentes pre-tratamientos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Construir las isotermas de adsorción de agua de las harinas obtenidas a partir de residuos de coliflor y brócoli, utilizando soluciones salinas saturadas como factores higroscópicos.
- Correlacionar los datos de la isoterma de adsorción con modelos matemáticos referenciales.
- Evaluar el efecto de los diferentes pre-tratamientos en las isotermas de adsorción de las harinas obtenidas.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Esta investigación se realizó utilizando recursos personales e internos pertenecientes a los laboratorios de la Unidad Operativa de Investigación y Desarrollo (UODIDE) de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato, los cuales se encuentran especificados en la Tabla 3.

Tabla 3

Recursos materiales que se utilizaron para el desarrollo del proyecto

Reactivos	**Cantidad**
Agua destilada	1000 ml
Alcohol al 70%	1000 ml
Cloruro de litio	50 g
Acetato de potasio	50 g
Cloruro de magnesio	50 g
Bromuro de sodio	50 g
Sulfato de amonio	50 g
Equipos	**Tiempo [h]**
Cámara de secado	120
Cocina industrial	32
Microondas	8
Balanza analítica	32
Material de Laboratorio	**Unidades**
Frascos herméticos	10
Vasos de precipitación	4
Bandejas	4
Espátula	1
Varilla de agitación	1
Cuchillo	1
Placas Petri	120
Papel aluminio	1
Papel absorbente	1

2.2. Métodos

2.2.1. Construir las isotermas de adsorción de agua de las harinas obtenidas a partir de residuos de coliflor y brócoli, utilizando soluciones salinas saturadas como factores higroscópicos.

2.2.1.1. Materia Prima

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizaron residuos de coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck), los cuales fueron adquiridos en mercados locales de la cuidad de Ambato, provincia de Tungurahua. Previo a este estudio se seleccionó la materia prima en función de su frescura, calidad visual y ausencia de daños mecánicos **(Anria et al., 2019)**.

2.2.1.2. Tratamientos Previos

Se estudió el efecto de los pretratamientos en las propiedades higroscópicas de las harinas por medio del modelamiento de las isotermas de absorción, ya que éstos suelen desempeñar un papel importante en la permeabilización, inactivación de enzimas (evita el pardeamiento enzimático), la oxidación y en la aceleración de la velocidad de secado de fruta y verduras **(Srimagal, 2016)**. Estas modificaciones pueden influir en su composición fisicoquímica, estructura celular y su capacidad de interacción con el agua, según menciona **Sánchez (2020)**, lo que será crucial para el modelamiento de las isotermas de absorción.

Entonces, se adaptó al procedimiento establecido por **Anria et al. (2019),** que menciona que las muestras son lavadas y troceadas formando láminas de 2 a 3 mm de espesor. Después, se procedió con los tratamientos previos, como se encuentran descritos a continuación.

2.2.1.2.1. Control

En este caso, aproximadamente 100 g de muestra tanto de coliflor como brócoli, fueron sometidos a la deshidratación directa, con el fin de tener una muestra control.

2.2.1.2.2. Cocción en Agua

Se colocó las especies vegetales en ebullición con agua en una relación de 1:15 (vegetal/agua) **(López Hernández, 2017)**. El tiempo de cocción fue registrado a partir del instante que se procedió a colocar las muestras en agua hirviendo y permaneció expuestas bajo estas condiciones por un lapso de 5 minutos. Consecuentemente, se enfriaron en agua corriente y se eliminó el exceso de agua con papel absorbente.

2.2.1.2.3. Cocción en Microondas

Para este proceso, se utilizó un horno de microondas que presenta una potencia de 750 W para tratar las muestras en un tiempo estipulado de 30 segundos **(López Hernández, 2017)**, considerando que esta metodología es la más agresiva en comparación con las demás.

2.2.1.2.4. Cocción en Vapor

La cocción de las muestras se realizó a vapor en un tiempo definido de 5 minutos. Teniendo en consideración que el material quedó suspendido sin tocar directamente el agua y la medición del tiempo se inició desde el momento en que las muestras entraron en contacto con el vapor **(López Hernández, 2017)**.

2.2.1.3. Secado y Elaboración de Harinas

El secado de las láminas se llevó a cabo mediante un secado de bandejas de flujo transversal que presentó una velocidad de 2 m/s y una temperatura de secado entre 65°C por 8 horas. Posteriormente se sometió a un proceso de molienda en un molino Hamilton Beach (modelo 80393, Picton, ON, Canada), en 3 intervalos de 10 s cada uno, para evitar que las matrices aumenten su temperatura. Finalmente, la harina se conservó en fundas aluminizadas.

2.2.1.4. Isoterma de Absorción

Para la construcción de las isotermas de absorción de agua, se empleó el método gravimétrico propuesto por **Wolf, Spiess y Jung (1985)** y **Spiess y Wolf (1987)**, que se basa en la determinación del contenido de humedad que presenta una muestra después de alcanzar su equilibrio con un aire de humedad relativa conocida **(Talens, 2020)**. Se colocó cada una de las muestras en un recipiente hermético con una humedad relativa controlada (11 a 80%), con la aplicación de soluciones salinas saturadas como factores higroscópicos (Tabla 4), mismas que son capaces de absorber o retirar humedad al ambiente hasta alcanzar un estado de equilibrio.

Posteriormente, se utilizó una balanza analítica de precisión para evaluar el peso de las muestras hasta alcanzar un peso constante ($\Delta P = \pm 0{,}0005\ g$), lo que significa que la cantidad de humedad del alimento que absorbe será igual a la que libera al ambiente, logrando el equilibrio higroscópico.

Tabla 4

Sales saturadas que se utilizaron como factores higroscópicos y sus actividades de agua

Nombre	Nomenclatura	Actividad de agua (a_w)
Cloruro de litio	LiCl	0,1178
Acetato de potasio	CH_3CO_2K	0,2982
Cloruro de magnesio	$MgCl_2$	0,3425
Bromuro de sodio	NaBr	0,5732
Sulfato de amonio	$(NH_4)_2SO_4$	0,8012

Fuente: (Acurio et al., 2023).

2.2.1.5. Cálculo de la Humedad de Equilibrio

La determinación del contenido de humedad en equilibrio [$x_{e(b.s)}$] de las harinas que fueron expuestas a humedades relativas controladas, se realizó con la Ecuación 1.

$$x_{e(b.s)} = \frac{P_0 x_o + \Delta P}{P_0(1 - x_o)} \quad \text{[Ec.1]}$$

Donde:

$x_{e(b.s)}$: humedad en equilibrio $\left[\frac{g_{H2O}}{g_{sólidos\ secos}}\right]$

P_0: peso inicial de la muestra $[g]$

x_o: humedad inicial de la muestra $\left[\frac{g_{H2O}}{g_{sólidos\ secos}}\right]$

ΔP: variación de peso (equilibrio – peso inicial) $[g]$

2.2.2. Correlacionar los datos de la isoterma de adsorción con modelos matemáticos referenciales

2.2.2.1. Modelado de las Isotermas de Adsorción

Los datos experimentales se ajustaron a los modelos de BET Y GAB descritos en la Tabla 5.

Tabla 5

Ecuaciones que se emplearon para el modelado de las isotermas de adsorción

Modelo	Ecuación	Ec.
Brunauer-Emmett-Teller (BET)	$x_e = \frac{x_m \times C_{BET} \times a_w}{(1 - a_w)\,[1 + (C_{BET} - 1)\,a_w]}$ Donde: x_e: humedad de equilibrio $\left[\frac{g_{agua}}{g_{sólidos\ secos}}\right]$ x_m: humedad en la monocapa (capa monomolecular absorbida) $\left[\frac{g_{agua}}{g_{sólidos\ secos}}\right]$ C_{BET}: constante relacionada con el calor de sorción.	[Ec.2]
Guggenheim-Anderson-DeBoer (GAB)	$x_e = \frac{x_m \times C_{GAB} \times K_{GAB} \times a_w}{[1 - (K_{GAB} \times a_w)]\,[1 - (1 - C_{GAB})(K_{GAB} \times a_w)]}$ Donde: x_e: humedad de equilibrio $\left[\frac{g_{agua}}{g_{sólidos\ secos}}\right]$ x_m: humedad de la monocapa (puntos primarios saturados por agua) $\left[\frac{g_{agua}}{g_{sólidos\ secos}}\right]$ C_{GAB}: constante de Guggenheim (calor de sorción de la monocapa). K_{GAB}: factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.	[Ec.3]

2.2.2.2. Análisis Estadístico

La evaluación de los modelos matemáticos de las isotermas de adsorción se relacionó estadísticamente en función del conjunto de datos obtenidos y su validación mediante la obtención del coeficiente de determinación (r^2), el error cuadrático medio $(RMSE)$ y la desviación porcentual relativa media $(MRPD)$ (Tabla 6) **(Mostafaei et al., 2016)**.

Tabla 6

Parámetros estadísticos que se aplicaron para el análisis de los modelos antes descritos

Parámetro	Ecuación	N°
Coeficiente de determinación	$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=0}^{n}(X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=0}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}$	[Ec.4]
Error cuadrático medio	$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}(X_i - Y_i)^2\right)}$	[Ec.5]
Desviación Porcentual media	$MRPD = 100 \cdot \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}\left\|\frac{X_i - Y_i}{Y_i}\right\|$	[Ec.6]

n: número de observaciones, X_i: valor experimental, Y_i: valor previsto, $\bar{X}$: valor medio experimental y $\bar{Y}$: valor medio previsto.

2.2.3. Evaluar el efecto de los diferentes pre-tratamientos en las isotermas de adsorción de las harinas obtenidas

Se realizó un ANOVA de varianza y una prueba de múltiples rangos Tukey para evaluar el efecto de los diferentes pre-tratamientos aplicados sobre la absorción del agua a una temperatura constante. Las variables que se consideró se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7

Variables que se consideraron para evaluar el efecto de los diferentes pre-tratamientos

Variables independientes (Pre-tratamientos)	Variable dependiente (Parámetros)
Control Agua en ebullición Microondas Vapor	$x_{m\ BET}$: humedad en la monocapa. C_{BET}: constante relacionada con el calor de sorción. $x_{m\ GAB}$: humedad de la monocapa. C_{GAB}: constante de Guggenheim. K_{GAB}: factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de resultados

3.1.1. Isotermas de Adsorción

3.1.1.1. Harina de Coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.)

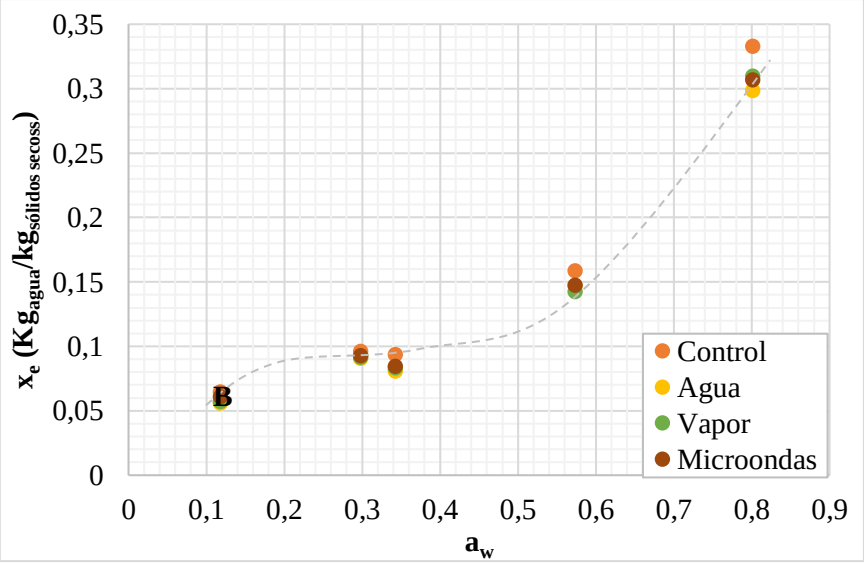
La Figura 9 representa las isotermas de adsorción de harinas de coliflor obtenidas a partir de cuatro pretratamientos. Se observa una relación directa entre la actividad de agua (a_w) y el contenido de humedad en equilibrio (x_e) de cada muestra. Se observa que cada curva se asemeja a una isoterma de tipo II (Figura 8) o también denominada sigmoidea, por su forma cóncava hacia la parte superior, relacionándose a procesos de adsorción en sólidos no porosos **(Nazreen et al., 2020)**.

Según **Omaña et al. (2010)**, afirman que la mayoría de los productos alimenticios presentan una isoterma de sorción de tipo II, lo que representa que las harinas elaboradas a partir de crucíferas formen parte de esta clasificación, debido a su naturaleza macroporosa de sitios polares activos y porosidad accesible que le atribuye una retención de agua a humedades relativas altas.

El comportamiento de adsorción se divide en tres regiones diferentes. En la primera, se observa la fase inicial de la adsorción monomolecular (x_m), donde cada molécula de agua se adhiere a los sitios más activos de la harina ($a_w < 0{,}2$), lo que muestra un proceso de absorción lento formando una pendiente baja. Sucesivamente, en la segunda región, el agua empieza a formar multicapas sobre la monocapa ya constituida ($0{,}2 < a_w < 0{,}6$), resultando una curva más pronunciada. En la tercera región predomina la concentración de agua en los poros más grandes por la presencia de actividades de agua elevadas, acelerando una penetración de agua en las capas restantes **(Orrego, 2003; Ruthven, 1985)**.

Figura 9

Isotermas de adsorción de harinas de coliflor sometidas a diferentes pretratamientos



Como se observa en la Figura 10, se obtuvo datos experimentales que demuestran que la actividad de agua es directamente proporcional a la humedad en equilibrio, representando esta relación en una isoterma de adsorción para cada pretratamiento con una desviación estándar (casi imperceptible) que mide la dispersión de los datos promedios. Cada gráfico representa la variación de las matrices de las harinas de *Brassica oleracea* var. *botrytis* L., demostrando una tendencia altamente higroscópica, ya que con el aumento la humedad relativa (HR) del ambiente (entre un 60 y 80%), los adsorbentes expuestos retuvieron la mayor cantidad de agua (0,15 $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólidos secos}}$ y 0,35 $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólidos secos}}$, respectivamente) a temperatura uniforme.

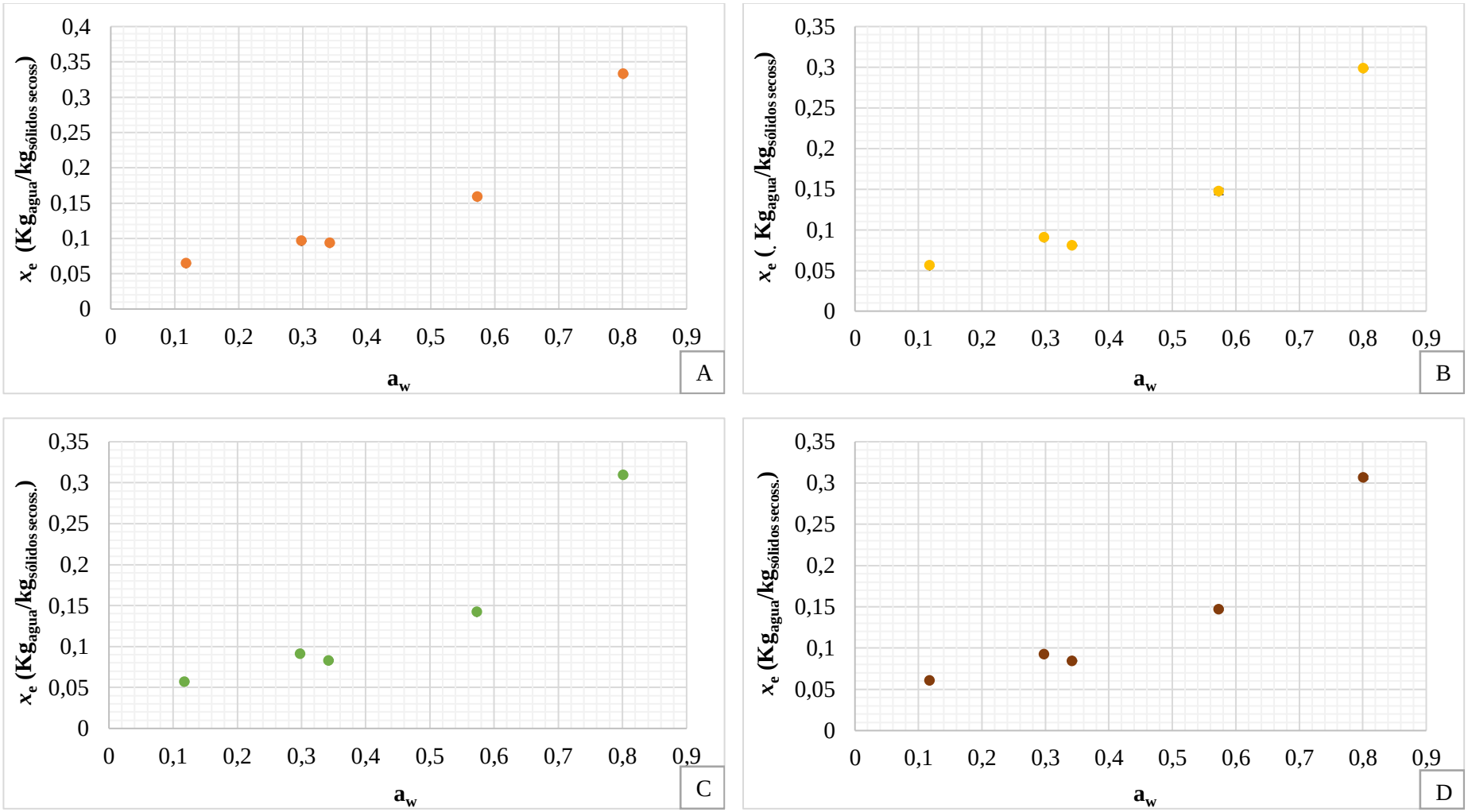
En la Figura 10A se observa el comportamiento de la muestra control, misma que presenta valores ligeramente más altos de x_e en comparación con las demás muestras, especialmente en la región III. Esto puede deberse a que su matriz celular está intacta, con una porosidad accesible que favorece la higroscopicidad; por ende, se puede considerar que esta muestra es más susceptible a la proliferación microbiana. Además, de la figura se puede inferir que esta harina requerirá un almacenamiento con una HR inferior al 60%, ya que a valores superiores la x_e tiende a aumentar rápidamente **(Ayala-Aponte, 2011)**.

Tanto la harina elaborada con el pretratamiento con agua en ebullición (Figura 10B) como con vapor (Figura 10C), aparentemente presentan una compactación celular, lo que conlleva a una reducción de los puntos activos de adsorción de agua. Mientras que, la muestra expuesta a microondas (Figura 10D) probablemente generó alteraciones térmicas, provocando que su matriz sea más densa con un colapso de microcapilares, lo que reduce su capacidad de retener agua. Un estudio reportado por **Luo et al. (2024)**, concluyó que los tratamientos en microondas disminuyen la higroscopicidad del alimento por la alteración de su microestructura interna. Para **Ayala-Aponte (2011)**, como para otros investigadores, el incremento de temperatura en productos ocasionan cambios físicos y químicos en su estructura, reduciendo significativamente el número de puntos activos, donde se unen cada molécula de agua con la superficie sólida del alimento.

Por otro lado, en la Tabla 8 se puede visualizar los cambios físicos respecto al color y textura de las harinas, exhibiendo un oscurecimiento progresivo a medida que aumenta la humedad relativa, particularmente en la muestra control que no sufrió ninguna desnaturalización de enzimas y continuó con los procesos de oxidación enzimática. Es evidente, que la muestra sometida a agua en ebullición conservó un color más claro frente a la muestra tratada con vapor, debido a la inactivación enzimática que previene el pardeamiento. Mientras que la muestra en microondas evidenció una tonalidad más intensa en cada humedad relativa, por un posible daño térmico.

Figura 10

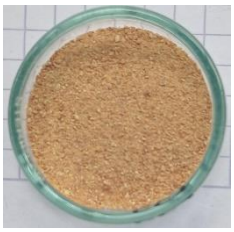
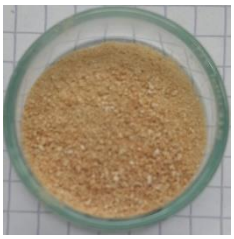
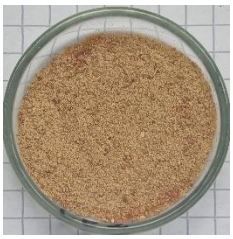
Curvas experimentales de las isotermas de adsorción de las harinas obtenidas a partir de residuos de coliflor



Nota. (A) Control, (B) Agua, (C) Vapor y (D) Microondas.

Tabla 8

Cambios físicos observados en las harinas de coliflor expuestas a diferentes HR

Humedad Relativa [%]	Control	Agua	Vapor	Microondas
11,78				
29,82				
34,25				
57,32				
80,12				

Nota. Estas muestras presentadas corresponden al día final de la recolección de datos.

3.1.1.2. Harina de Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck)

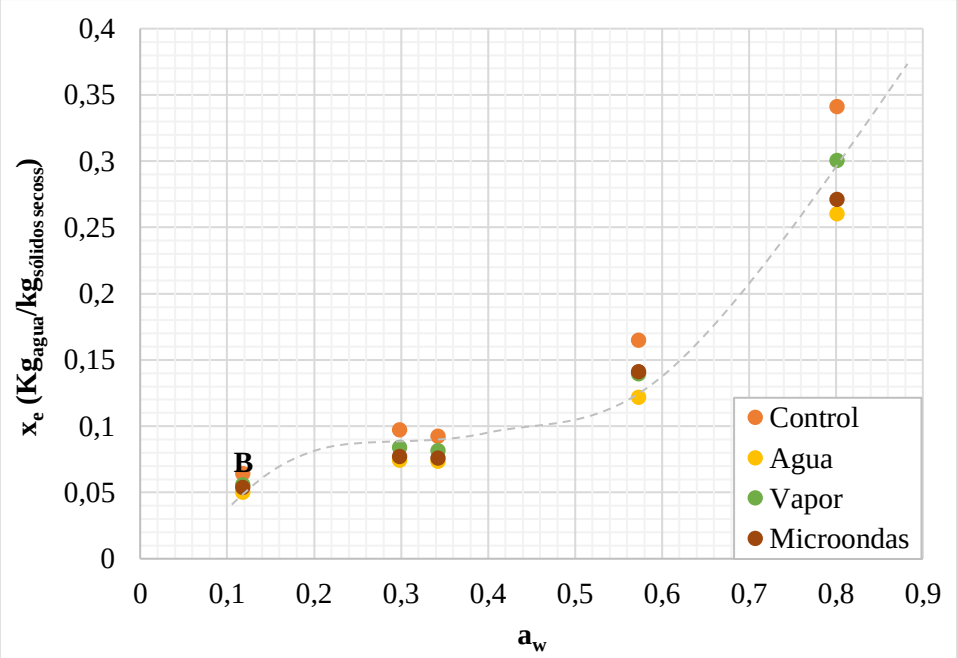
La harina de brócoli presenta curvas similares a las observadas en la harina de coliflor (Figura 11); es decir, presentan una forma de tipo II, según la clasificación de IUPAC para isotermas de equilibrio gas-sólido. Resultados similares han sido reportados en harinas de diferentes alimentos deshidratados y macroporosos, donde su interacción (agua-sólido) es inicialmente débil y se incrementa conforme se completan los espacios capilares **(Saavedra, 2022)**.

Este tipo de curva muestra una absorción de un adsorbato sobre un adsorbente por su alta afinidad higroscópica a temperatura constante, que es reflejado en un aumento gradual de la humedad de equilibrio conforme aumenta la humedad relativa. Por lo que, se expone a una adsorción sin restricciones tanto en monocapa como multicapa, señalando que en el punto de inflexión (punto B) se completa la monocapa y marca un inicio de adsorción en multicapas.

Por otro lado, se considera que los procesos de secado y molienda, por menos agresivos que se intente que sean, generan alteraciones estructurales en la matriz alimentaria, mismo que normalmente generan la liberación de grupos funcionales hidrófilos que influyen directamente en el aumento de puntos activos para la absorción, ya que se unen fácilmente con el agua debido a por su polaridad **(Oyinloye & Yoon, 2020)**.

Figura 11

Isotermas de adsorción de harinas de brócoli sometidas a diferentes pretratamientos



En la Figura 12 se ilustran isotermas de adsorción de harinas de brócoli elaboradas mediante tres diferentes pretratamientos. Se observa un comportamiento ascendente conforme incrementa la a_w, indicando mayor capacidad de sorción de agua (0,15 kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$ y 0,35 kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$) a mayor humedad del entorno. También, se evidencia notoriamente las diferencias de adsorción entre cada tratamiento, a partir de valores de ($a_w > 0{,}6$).

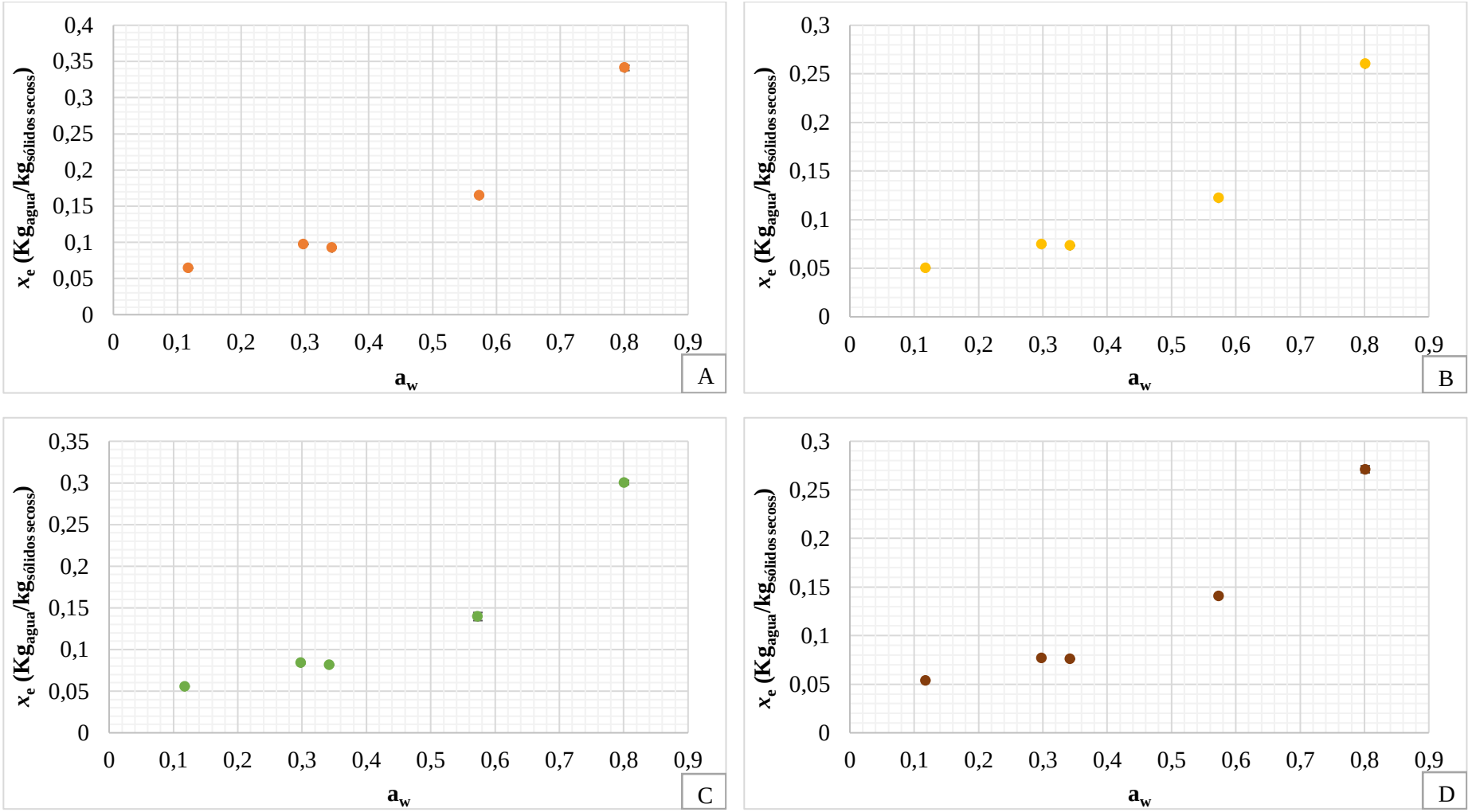
Considerando los puntos experimentales a una $a_w \approx 0{,}8$, el comportamiento de la muestra sin tratamiento (Figura 12A) presenta una mayor capacidad de absorber agua (0,34 kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$), lo que puede deberse a la presencia de enzimas activas y una estructura celular abierta, disponiendo de sitios activos de adsorción. Mientras que, tanto la muestra sometida a agua en ebullición (Figura 12B), como a vapor (Figura 12C), representan curvas similares y ligeramente inferiores a la muestra control, con valores de x_e de 0,26 kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$ y 0,30 kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$, respectivamente. Estas tendencias se deben al pretratamiento previo al secado que provocó una desnaturalización de las proteínas, reduciendo así su porosidad y la ausencia de sitios de adsorción.

No obstante, la muestra a microondas (Figura 12D) muestra un comportamiento intermedio de adsorción con relación a las demás muestras, con un valor de 0,27 kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$ en x_e. Si bien es un tratamiento más rápido, podría no ser tan ideal, ya que causa colapsos celulares que forman regiones amorfas; es decir, no presentan una estructura interna ordenada y tienen grupos funcionales libres aptos para formar puentes de hidrógeno **(Safandowska et al., 2022)**.

La Tabla 9 representa los cambios físicos de las harinas, evidenciando variaciones de tonalidades al estar expuesta a humedades relativas altas. En este caso, la muestra control mantiene el color verde del brócoli, mismo que va perdiendo su intensidad a partir de una HR > 29,82%, resultando un color verde amarillento. La muestra pretratada con vapor presenta un color verde más claro y una textura más compacta debido a la adsorción de agua (HR ≥ 80,12%), lo que probablemente se deba a la desnaturalización del pigmento verde (clorofila). En el caso del pretratamiento con microondas se observa un tono marrón claro, debido a una posible presencia de reacciones de Maillard (entre azúcares y aminoácidos) por el tratamiento térmico expuesto. Mientras que la harina elaborada con el pretratamiento de agua en ebullición evidenció un color menos alterado y una textura fina, se puede predecir que esta muestra sufre una degradación mínima, lo que indica una buena estabilidad frente a las demás muestras.

Figura 12

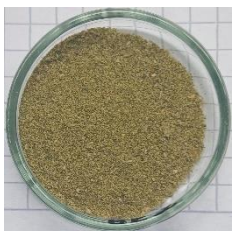
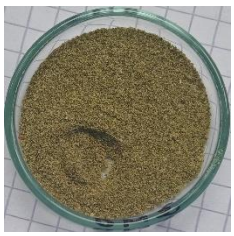
Curvas experimentales de las isotermas de adsorción de las harinas obtenidas a partir de residuos de brócoli



Nota. (A) Control, (B) Agua, (C) Vapor y (D) Microondas.

Tabla 9

Cambios físicos observados en las harinas de brócoli que fueron expuestas a diferentes HR

Humedad Relativa [%]	Control	Agua	Vapor	Microondas
11,78				
29,82				
34,25				
57,32				
80,12				

Nota. Estas muestras presentadas corresponden al día final de la recolección de datos.

3.1.2. Modelado matemático de las isotermas de sorción

3.1.2.1. Análisis de los modelos GAB y BET para harina de coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.)

Los datos obtenidos en las isotermas de adsorción fueron ajustados a los modelos matemáticos de BET y GAB con la finalidad de predecir el comportamiento del agua en el alimento expuesto a diferentes humedades relativas. Los parámetros obtenidos en el ajuste se describen en la Tabla 10. La humedad monomolecular adsorbida (x_m), representa el agua unida a un grupo polar e iónico y la constante del calor de sorción (C_{BET} y C_{GAB}), que relaciona una diferencia entre las moléculas que absorben energía tanto de la primera capa como de las demás **(Andrade et al., 2011)**.

Tabla 10

Parámetros obtenidos en el modelado de isotermas de adsorción en harinas de coliflor

Parámetro	Control	Agua	Vapor	Microondas
		BET		
x_m [kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$]	0,0659	0,0592	0,0604	0,0604
C_{BET}	60,2105	51,1014	51,9872	90,7740
R^2	0,9794	0,9356	0,9487	0,9540
		GAB		
x_m [kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$]	0,0681	0,0627	0,0617	0,0631
C_{GAB}	39,0205	28,7670	38,7487	44,1168
K_{GAB}	0,9964	0,9908	0,9998	0,9945
R^2	0,9730	0,9132	0,9394	0,9415

Cada uno de los modelos se ajustaron correctamente, pero es el modelo de BET evidenció valores más altos en el coeficiente de determinación (R^2) en comparación con el modelo de GAB. Según **Abdullah et al. (2020)**, este modelo representa un ajuste efectivo para diversas variedades de alimentos entre 0,05 – 0,45 de actividad de agua, mientras que el modelo de GAB alcanza valores de $a_w \leq 0{,}90$; contando con mayor número de datos para que su alcance de observación sea más amplio.

También, se observa que los valores de capacidad de la monocapa $x_m(BET)$ es menor a $x_m(GAB)$, representado que la cantidad de agua va a estar ligada a los sitios de adsorción, siendo ligeramente diferentes por su rango de aplicación. Mientras que, la constante de energía C_{BET} es mayor al valor de C_{GAB}, debido a que C_{BET} asume que todos los sitios activos de absorción presentan la misma energía de interacciones en la capa superficial, asimilando que puede retener más agua en la monocapa, mientras que C_{GAB} considera que no todos sitios son similares y que algunos tienen la capacidad de absorber más agua y otras menos, lo cual estima menos cantidad de agua en la monocapa (calor de sorción se reduce), corroborando lo reportado por **Timmermann et al. (2001),** que $x_m(BET) < x_m(GAB)$ y $C_{BET} > C_{GAB}$, que se atribuyen a la naturaleza matemática de las ecuaciones.

Además, mediante un análisis comparativo de la constante de calor de sorción, se notó que los valores obtenidos con la harina elaborada mediante un pretratamiento con agua en ebullición son más bajos (C_{BET}: 51,1014 y C_{GAB}: 28,7670), lo que supone una menor afinidad energética. De forma contraria, el pretratamiento realizado con microondas presenta valores superiores de C_{BET} (90,7740) y C_{GAB} (44,1168), lo que indica una interacción energética fuerte del agua con la superficie **(Quirijns et al., 2005)**. Cabe destacar que forma de la curva está netamente relacionada con la constante C; cuando este valor tiende a ser mayor que 2, representa la existencia de un punto de inflexión en la curva.

El parámetro K_{GAB} obtenido relaciona la interacción de agua con las capas posteriores a la inicial, midiendo la afinidad del agua por las multicapas, estableciendo un intervalo entre 0,24 y 1. Como se obtuvo valores cercanos a 1, esto nos indica que las múltiples capas tienen un comportamiento similar al agua líquida libre y menos ligada; es decir, no se encuentra firmemente retenida y podrá movilizarse o evaporarse fácilmente **(Solano Rodriguez, 2019).** El pretratamiento que presenta un valor superior es el realizado con vapor con un K_{GAB} (0,9998), cercano a la unidad.

Tanto el modelo BET como GAB presenta diferencias en las interacciones agua-sólido, destacando que todos los modelos se encuentran bien ajustados (R^2 altos), y que los parámetros (x_m, C, K) varían por el impacto generado de cada pretratamiento sobre la microestructura y su afinidad por el agua.

3.1.2.2. Análisis de los modelos GAB y BET para harina de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck)

La Tabla 11 describe los parámetros obtenidos por medio del modelamiento en isotermas de adsorción en harinas de brócoli que fueron tratadas con diferentes pretratamientos. Por tanto, se empleó los modelos GAB y BET para predecir el comportamiento higroscópico de este alimento deshidratado.

Tabla 11

Parámetros obtenidos en el modelado de isotermas de adsorción en harinas de brócoli

Parámetro	Control	Agua	Vapor	Microondas
		BET		
x_m [kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$]	0,0658	0,0520	0,0582	0,0531
C_{BET}	61,9309	47,8043	49,4648	78,2716
R^2	0,9707	0,9840	0,9763	0,9858
		GAB		
x_m [kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$]	0,0698	0,0532	0,0607	0,0586
C_{GAB}	31,1238	36,8605	31,1736	26,1470
K_{GAB}	0,9974	0,9953	0,9995	0,9920
R^2	0,9502	0,9807	0,9651	0,9320

El parámetro x_m representa la capa absorbida en la capa monomolecular; es decir, la cantidad de agua que está ligada a los sitios más energéticos de la harina. Los valores del modelo de BET oscilan entre 0,0520 y 0,0658 kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$, mientras que el modelo de GAB presenta valores superiores entre 0,0532 y 0,0698 kg $_{\text{agua}}$/kg $_{\text{sólidos secos}}$. Esta diferencia se debe a que el modelo BET considera que todos los sitios activos de adsorción son idénticos ($0{,}05 < a_w < 0{,}35$), pero en realidad cada alimento presenta una estructura compleja, con sitios activos de naturaleza diferente por la presencia de carbohidratos, proteínas y fibras. Mientras que, el modelo GAB asume que los sitios de adsorción tienen diferente energía y afinidad para retener el agua ($a_w \leq 0{,}90$), lo que estima un valor más preciso.

Los pretratamientos con agua en ebullición y microondas presentan valores menores de x_m para ambos modelos. En la muestra tratada con agua puede deberse a una hidratación de los componentes hidrofílicos (proteínas o pectinas), reduciendo sus sitios activos. Mientras que en la muestra expuesta a microondas pudo haberse inducido un colapso de la estructura porosa y una desnaturalización de las proteínas, como se ha descrito en estudios similares (**Sabry et al., 2016)**.

Consecuentemente, las constantes C_{BET} y C_{GAB} indican la energía de sorción del agua en la monocapa. Los resultados obtenidos demuestran que los valores de C_{BET} son mayores que el C_{GAB}, lo que relaciona con lo reportado por **Timmermann et al. (2001)**. En este caso, en el modelo BET, el tratamiento por microondas presenta un valor superior (78,2726), lo que se relaciona con el hecho de que, aunque existan menos sitios de adsorción, aquellos restantes tienen una alta capacidad de retener agua. Por otro lado, en el modelo GAB los valores de C_{GAB} se encuentran en un rango de 26,1479 y 36,8605, siendo el pretratamiento con agua en ebullición el que representa una energía más alta, que refleja una conservación en su funcionalidad superficial **(Hernández et al., 2021)**.

En el análisis de la constante K_{GAB}, que muestra la energía de absorción de las multicapas, se observan valores <1 (0,9920 y 0,9995; respectivamente), lo cual indica que el agua retenida en las capas superiores es similar a la energía del agua líquida. Un valor de K_{GAB} cercano a 1 evidencia la presencia de agua poco ligada en la multicapa, característicos en matrices con poros abiertos y una retención capilar baja.

Los dos modelos matemáticos empleados se ajustaron correctamente a los datos experimentales, mostrando un coeficiente de correlación > 0,93, que indica una concordancia entre los resultados y las predicciones del modelo, siendo el modelo de BET el que presentó un R^2 superior en la mayoría de los casos. Los resultados reflejan que el tratamiento a microondas representa una mejor alternativa de conservación, ya que evita la adsorción excesiva en ambientes húmedos debido a la presencia de menos sitios activos, pero que tienden a ser más energéticos. Según **Vázquez et al. (2020)**, la elección de un pretratamiento dependerá de un equilibrio, entre la capacidad de adsorción de agua, el ajuste o estabilidad del modelo y las propiedades funcionales que se desea conservar del producto final.

3.1.3. Evaluación del efecto de los diferentes pre-tratamientos en las isotermas de adsorción

3.1.3.1. Análisis de los parámetros GAB y BET en las harinas de coliflor

Por medio de la aplicación de la prueba de múltiples rangos Tukey, se observa que existe diferencias significativas en x_m del modelo BET entre los pretratamientos (Tabla 12), a excepción del tratamiento con vapor y microondas. Mientras que en el modelo GAB se han identificado dos grupos homogéneos sin diferencias significativas entre sí, indicando que sus cambios estructurales se pueden considerar iguales.

Tabla 12

Análisis estadístico de la humedad en monocapa de la harina de coliflor

Tratamiento	$x_{m_{BET}}$ [kg agua/kg sólidos secos]	$x_{m_{GAB}}$ [kg agua/kg sólidos secos]
Control	0,0659 ± 0,0004 [a]	0,0682 ± 0,0003 [a]
Agua	0,0591 ± 0,0003 [c]	0,0633 ± 0,0013 [b]
Vapor	0,0606 ± 0,0005 [b]	0,0618 ± 0,0007 [b]
Microondas	0,0654 ± 0,0002 [b]	0,0631 ± 0,0002 [b]

En la Tabla 13 se muestra el análisis estadístico de la constante C, que relaciona la energía fuerte para absorber el agua en la capa monomolecular. En el modelo BET, es el pretratamiento con microondas el que describe un valor significativamente elevado (91,2524), con una desviación estándar alta (± 8,0966) (Figura 13B), lo que representa una mayor afinidad del agua en los sitios de adsorción y una variabilidad experimental considerable. Los pretratamientos con agua en ebullición y vapor presentan valores más bajos y desviaciones menores, lo que refleja una menor energía para la absorción. Por lo contrario, en el modelo GAB, los pretratamientos con agua, vapor y microondas señala que las medias de cada grupo son significativamente diferentes entre sí (Figura 13D).

Tabla 13

Análisis estadístico de la constante de calor de sorción de la harina de coliflor

Tratamiento	C_{BET}	C_{GAB}
Control	59,7548 ± 3,5399 [b]	38,6424 ± 0,7701 [ab]
Agua	52,1367 ± 2,2435 [b]	27,2695 ± 3,4260 [c]
Vapor	49,3550 ± 2,9425 [b]	37,6521 ± 1,8363 [b]
Microondas	91,2541 ± 8,0966 [a]	44,1942 ± 2,1216 [a]

El parámetro K_{GAB} representa la energía de adsorción en las capas posteriores a la monocapa. Como se observa en la Tabla 14, el tratamiento a vapor presenta un valor más alto (1,0000) en relación con el tratamiento realizado con agua en ebullición (Figura 13E). De forma general se puede evidenciar que los valores en todos los casos son homogéneos.

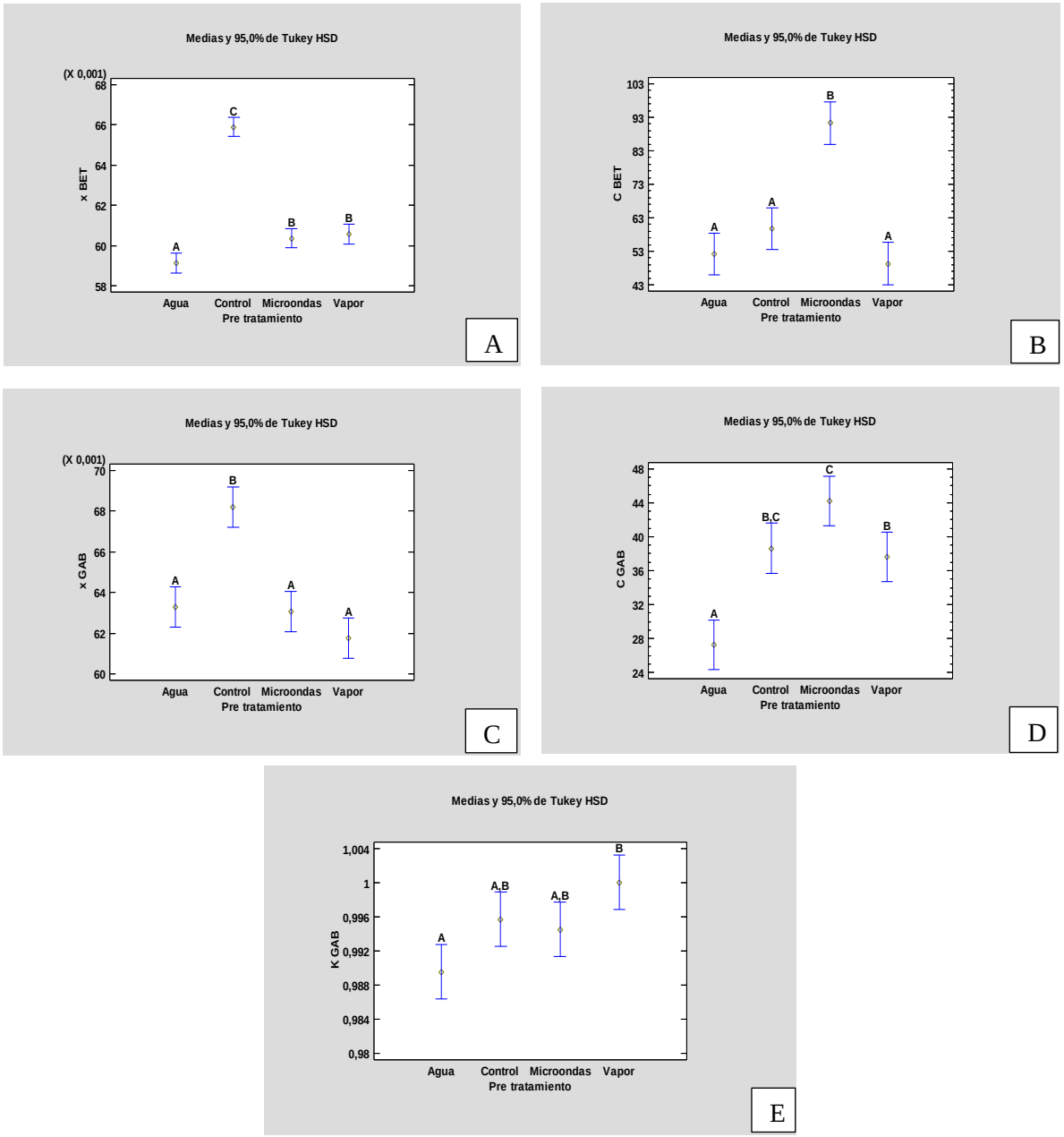
Tabla 14

Análisis estadístico del factor de corrección de la harina de coliflor

Tratamiento	K_{GAB}
Control	0,9957 ± 0,0005 [ab]
Agua	0,9895 ± 0,0031 [b]
Vapor	1,0000 ± 0,0032 [a]
Microondas	0,9945 ± 0,0019 [ab]

Figura 13

Gráficos de medias a partir de los parámetros GAB y BET de las harinas obtenidas a partir de residuos de coliflor



Nota. (A) x_m [kg agua/kg sólidos secos] (BET), (B) C_{BET}, (C) x_m [kg agua/kg sólidos secos] (GAB), (D) C_{BET} y (E) K_{GAB}.

3.1.3.2. Análisis de los parámetros GAB y BET en las harinas de brócoli

En la Tabla 15 se puede visualizar que la humedad en la monocapa determinada con el modelo de BET muestra diferencias significativas entre los pretratamientos, siendo el control el que presenta un valor más alto (0,0658 kg $_{agua}$/kg $_{sólidos\ secos}$) (Figura 14 A). De forma contraria, la disminución de $x_{m_{BET}}$ en las muestras pretratadas con agua en ebullición y microondas, se debe a la modificación de los sitios activos de adsorción agua. Resultados similares se observaron con el modelo de GAB (Figura 14C).

Tabla 15

Análisis estadístico de la humedad en monocapa de la harina de brócoli

Tratamiento	$x_{m_{BET}}$ [kg $_{agua}$/kg $_{sólidos\ secos}$]	$x_{m_{GAB}}$ [kg $_{agua}$/kg $_{sólidos\ secos}$]
Control	0,0658 ± 0,0005 [a]	0,0695 ± 0,0005 [a]
Agua	0,0518 ± 0,0004 [d]	0,0525 ± 0,0007 [c]
Vapor	0,0581 ± 0,0003 [b]	0,0596 ± 0,0014 [b]
Microondas	0,0529 ± 0,0003 [c]	0,0583 ± 0,0009 [b]

En la Tabla 16 se muestran las constantes C_{BET} y C_{GAB} que relacionan la afinidad de la monocapa de agua y sus sitios de adsorción. El modelo de BET denota que la muestra pretratada con microondas presenta un valor mayor (82,9881), siendo significativamente diferente frente a las demás. Esto indica que esta muestra tiene mayor afinidad por el agua debido a la presencia de sitios polares (Figura 14B). En el modelo de GAB se observan diferencias significativas entre los pretratamientos con agua y microondas debido al incremento de sus sitios activos por la formación de estructuras amorfas.

Tabla 16

Análisis estadístico de la constante de calor de sorción de la harina de brócoli

Tratamiento	C_{BET}	C_{GAB}
Control	62,3527 ± 6,4849 [b]	31,8916 ± 0,4518 [ab]
Agua	51,9136 ± 7,8602 [b]	42,4229 ± 5,3180 [a]
Vapor	49,9726 ± 0,4636 [b]	36,6953 ± 8,2713 [ab]
Microondas	82,9881 ± 11,0034 [a]	26,8671 ± 2,7513 [b]

En los resultados del factor de corrección K_{GAB} no se observan diferencias significativas entre los pretratamientos (Figura 14D). Este comportamiento señala que el pretratamiento no tuvo efectos significativos sobre este parámetro evaluado.

Tabla 17

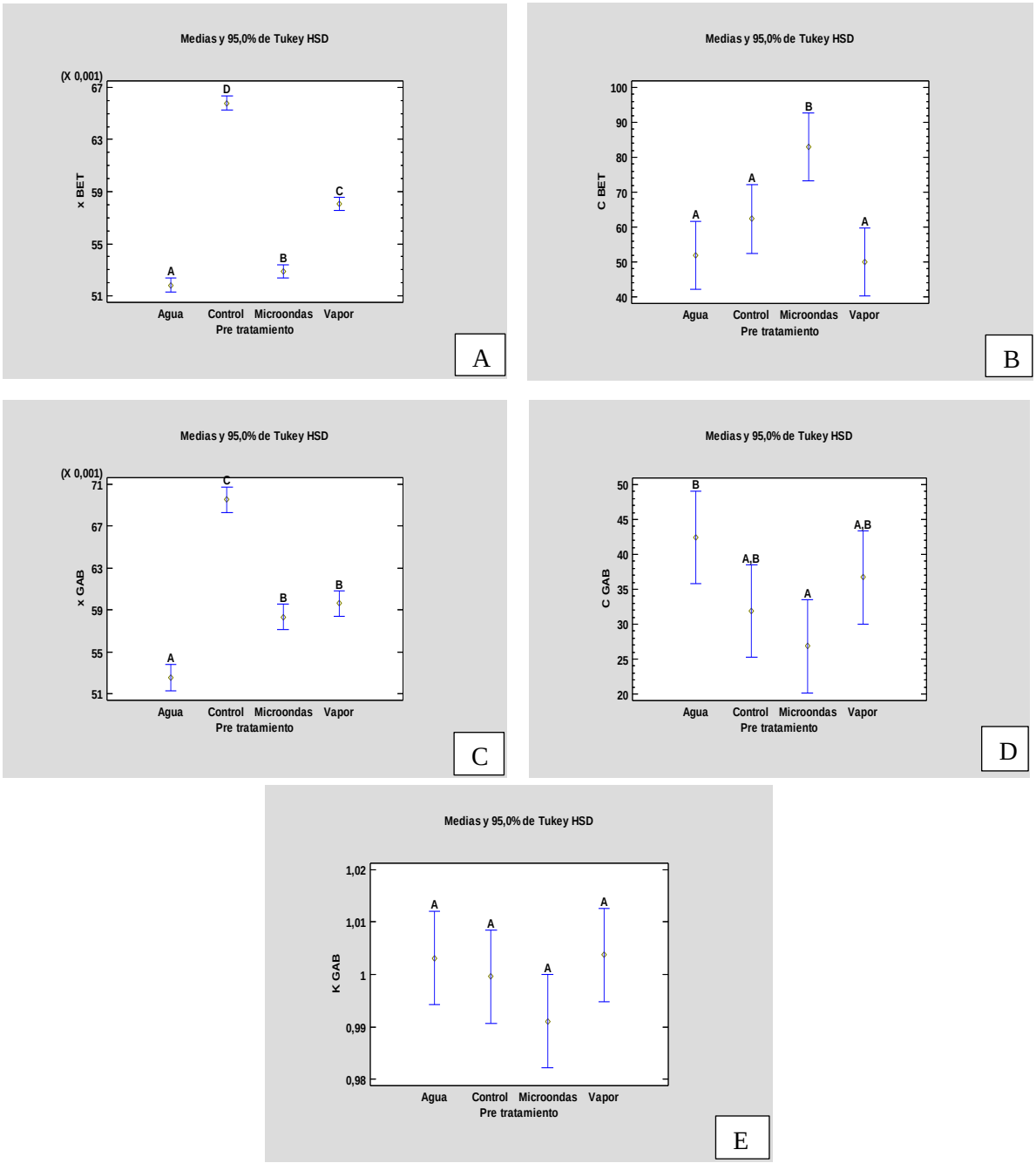
Análisis estadístico del factor de corrección de la harina de brócoli

Tratamiento	K_{GAB}
Control	0,9996 ± 0,0043 [a]
Agua	1,0031 ± 0,0114 [a]
Vapor	1,0037 ± 0,0020 [a]
Microondas	0,9911 ± 0,0056 [a]

La prueba de Tukey mostró que las constantes de sorción y la humedad en la monocapa son afectadas significativamente por los pretratamientos empleados, principalmente por el tratamiento con microondas que presenta un comportamiento diferenciado con las demás, probablemente por las modificaciones recibidas en su estructura, antes ser transformadas en harinas.

Figura 14

Gráficos de medias a partir de los parámetros GAB y BET de las harinas obtenidas a partir de residuos de brócoli



Nota. (A) x_m [kg agua/kg sólidos secos] (BET), (B) C_{BET}, (C) x_m [kg agua/kg sólidos secos] (GAB), (D) C_{BET} y (E) K_{GAB}

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Tanto la harina de coliflor como la de brócoli presentaron isotermas de adsorción de agua con una tendencia de tipo sigmoideo (II), debido a su naturaleza macro-porosa de sitios activos de adsorción, que les atribuye la retención de agua a humedades relativas altas. Esta curva demuestra su comportamiento altamente higroscópico, con un punto de inflexión donde se completa la adsorción de la monocapa e inicia la adsorción por multicapas.

- A mayor humedad relativa del ambiente (60 – 80%), las harinas presentaron una mayor capacidad de absorción, con un rango de humedad de equilibrio de 0,15 - 0,35 $kg_{agua}/kg_{sólidos\ secos}$, a temperatura constante. La harina de brócoli presentó una característica más higroscópica que puede deberse a un alto contenido de fibra y proteínas, representando una disposición de moléculas dentro de la superficie del adsorbente con mayor disponibilidad para la absorción del agua, con respecto a la harina de coliflor.

- Se puede deducir que para que ambas matrices conserven una estabilidad durante su almacenamiento requerirán ser conservadas a una humedad relativa inferior al 60% para que alcancen una humedad de equilibrio inferior a los 0,14 $kg_{agua}/kg_{sólidos\ secos}$, ya que expuesta a humedades relativas superiores la cantidad de agua adsorbida tiende a aumentar rápidamente.

- Mediante la aplicación de los modelos matemáticos de GAB y BET se observó que ambas ecuaciones se ajustaron correctamente a los datos experimentales obtenidos, mostrando un coeficiente de correlación superior al 90%, que indica una concordancia entre los resultados y las predicciones del modelo. El modelo de BET presentó valores de correlación superiores hasta una humedad relativa de 34,25%, mientras que el modelo de GAB proporcionó una interpretación completa en todo el rango de humedad relativa estudiado. Así mismo, los parámetros K_{GAB} obtenidos fueron cercanos a 1, describiendo que las multicapas tienen un comportamiento similar al agua líquida libre y menos ligada.

- La humedad en la capa inicial y las constantes de sorción fueron afectadas significativamente por los pretratamientos aplicados a los residuos de coliflor y brócoli. En este caso, es el tratamiento a microondas el que denotó un comportamiento diferenciado de sus medias con relación a las demás, ya que evidenció una menor capacidad de la monocapa, pero una mayor afinidad del agua en los sitios activos, lo que mejoraría su estabilidad microbiológica.

4.2. Recomendaciones

- Realizar el análisis de las isotermas de adsorción de agua utilizando diferentes sales higroscópicas para obtener un rango más amplio de humedades relativas.

- Aplicar más modelos matemáticos para visualizar el mejor ajuste de los valores experimentales en las isotermas de adsorción, como los de Oswin, Smith, Chung y Pfost.

- Estudiar a profundidad cuáles son los componentes que están siendo alterados o se ven afectados durante la aplicación de los pretratamientos aplicados.

BIBLIOGRAFÍA

Abdullah, S., Keoh, S. C., Johar, H. M., Razak, N. A., Shaari, A. R., & Rukunudin, I. H. (2020). Mathematical modelling of moisture sorption isotherms by using BET and GAB models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *932*(1), 012037. https://doi.org/10.1088/1757-899X/932/1/012037

Achón Tuñón, M., González González, M., & Varela-Moreiras, G. (2018). Functional harmony criteria between gastronomy and health: the scientific community vision. *Nutricion Hospitalaria*, *35*(4), 75–84. https://doi.org/10.20960/NH.2131

Acurio, L., Baquerizo, A., Borja, A., Vayas, M., García-Segovia, P., Martínez-Monzó, J., & Igual, M. (2023). Water-Sorption Isotherms and Air-Drying-Kinetics Modelling of Andean Tubers and Tuberous Roots. *Biology and Life Sciences Forum 2023, Vol. 26, Page 71*, *26*(1), 71. https://doi.org/10.3390/FOODS2023-15141

Ağagündüz, D., Şahin, T. Ö., Yilmaz, B., Ekenci, K. D., Duyar Özer, Ş., & Capasso, R. (2022). Cruciferous Vegetables and Their Bioactive Metabolites: from Prevention to Novel Therapies of Colorectal Cancer. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, *2022*(1), 1534083. https://doi.org/10.1155/2022/1534083

Álvarez Merino, M. Á., Carrasco Marín, F., & Maldonado Hódar, J. F. (2014). Desarrollo y aplicaciones de materiales avanzados de carbón. In *Desarrollo y aplicaciones de materiales avanzados de carbón* (Universida). http://hdl.handle.net/10334/3621

Andrade, R. D. P., Roberto, L. M., & Pérez, C. E. C. (2011). Models of sorption isotherms for food: Uses and limitations | Modelos de isotermas de sorcion para alimentos: Usos y limitaciones. *Vitae*, *18*(3), 325–334. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-40042011000300012&script=sci_arttext&tlng=en

Anderson, R.B. 1946. Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller equation. Journal of the American Chemical Society, 68, 686–691.

Anria, M., González, A., & Quintero, R. (2019). Modelado de la isoterma de adsorción de zanahorias deshidratadas. *I+D Tecnológico*, *15*(1), 17–23. https://doi.org/10.33412/idt.v15.1.2093

Arslan, A., & Alibaş, İ. (2024). Assessing the effects of different drying methods and minimal processing on the sustainability of the organic food quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *94*, 103681. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2024.103681

Ayala-Aponte, A. (2011). ESTIMACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN Y DEL CALOR ISOSTÉRICO EN HARINA DE YUCA. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y*

Agroindustrial, *9*(1), 88–96. https://doi.org/http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612011000100011

Badui Degal, S. (2006). Química de los Alimentos. In E. Q. Duarte (Ed.), *Química de los alimentos* (Cuarta edi). PEARSON EDUCACIÓN.

Baenas, N., Vega-García, A., Manjarrez-Marmolejo, J., Moreno, D. A., & Feria-Romero, I. A. (2023). The preventive effects of broccoli bioactives against cancer: Evidence from a validated rat glioma model. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *168*, 115720. https://doi.org/10.1016/J.BIOPHA.2023.115720

Bas-Bellver, C., Barrera, C., Noelia Betoret, & Seguí, L. (2022). Impact of Disruption and Drying Conditions on Physicochemical, Functional and Antioxidant Properties of Powdered Ingredients Obtained from Brassica Vegetable By-Products. *Current Research in Nutrition and Food Science*, *8*(3), 837–851. https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.8.3.15

Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E. (1938) Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. Journal of the American Chemistry Society, 60, 309.

de Boer, J.H. (1953). The Dynamical Character of Adsorption. Oxford University Press, Oxford.

Cezar Alves, N. M., Arruda Silva, T. A., Caires Galle, N. B., & David Saikhonem, I. (2021). Vista do Isotermas de adsorção de umidade de farinhas de amêndoa de baru. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, *16*(3), 1–7. https://doi.org/10.5039/agraria.v16i3a8719

Díaz-Pérez, M., Moreno, J. M. M., García, J. J. H., & Callejón-Ferre, Á. J. (2024). Application of microalgae in cauliflower fertilisation. *Scientia Horticulturae*, *337*, 113468. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2024.113468

Fiorin, T. T., Menegaes, J. F., Rodrigues, A. M., & Swarowsky, A. (2022). Broccoli and cauliflower seedling emergence and production in different substrates. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *16*(2), e14339–e14339. https://doi.org/10.17584/RCCH.2022V16I2.14339

González Fandos, E., & Simón, A. (2016). Efecto de la cocción sobre la capacidad antioxidante y calidad sensorial de la coliflor mínimamente procesada. *Nutrición Hospitalaria*, *33*(2), 373–378. https://doi.org/10.20960/NH.119

Guggenheim, E. (1966). Application of Statistical Mechanics. Oxford University Press, Oxford

Gutiérrez Tlahque, J., Santiago Sáenz, Y. O., Hernández Fuentes, A. D., Pinedo Espinoza, J. M., López Buenabad, G., López Palestina, C. U., Gutiérrez Tlahque, J., Santiago Sáenz, Y. O., Hernández Fuentes, A. D., Pinedo Espinoza, J. M., López Buenabad, G., & López Palestina, C. U. (2019).

Influencia de los métodos de cocción sobre la actividad antioxidante y compuestos bioactivos de tomate (Solanum lycopersicum L.). *Nova Scientia*, *11*(22), 53–68. https://doi.org/10.21640/NS.V11I22.1685

Hameed, A., Fatima, N., Iftikhar, H., Mehmood, A., Tariq, M. R., Ali, S. W., Ali, S., Shafiq, M., Ahmad, Z., Ali, U., Ghazanfar, M., Iftikhar, M., Safdar, W., Ahmad, A., Basharat, Z., Umer, Z., & Khalid, M. (2023). Effect of different drying and cooking treatments on phytochemicals and antioxidant activity in broccoli: an experimental in vitro study. *Food Science and Technology*, *43*, e101622. https://doi.org/10.1590/FST.101622

Heldman, D. R., & Lund, D. B. (2006). Handbook of food engineering, second edition. In *Handbook of Food Engineering, Second Edition* (Editorial). CRCPress.

Hernández, Y., Socorro, A., & Vega, M. (2021). Isoterma de adsorción de moléculas de agua en hojas secas de Justicia pectoralis Jacq. (tilo). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, *24*(4), 13. https://orcid.org/0000-0002-6495-6920

Illescas, J. L., Bacho, O., & Ferrer, S. (2008). *Frutas y hortalizas: guía práctica* (Empredsa N). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mercasa.es/wp-content/uploads/2022/03/Guia_practica_frutas_y_hortalizas.pdf

Jiménez Prieto, M. (2020). *Efectos del cocinado de los alimentos sobre los compuestos fitoquímicos y la actividad antioxidante*. https://uvadoc.uva.es/handle/10324/42173

Kendall, P., Dipersio, P., & Sofos, J. (2012). Drying Vegetables Fact. In *Colorado State University* (Issue 9). https://foodsafety.ces.ncsu.edu/wp-content/uploads/2017/06/Drying-Vegetables-CSU-fact-sheet.pdf?fwd=no

Kobayashi, S., Kondo, T., Rojas-Ramírez, D. A., & Kobayashi, N. (2023). Verduras y frutas para todos: Enciclopedia didáctica y visual. In *Verduras y frutas para todos: Enciclopedia didáctica y visual* (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7406368

López Hernández, A. A. (2017a). *Efecto de diferentes métodos de cocción en el contenido de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante en brócoli (Brassica oleracea var. Italica) y coliflor (Brassica oleracea var. Botrytis).*

López Hernández, A. A. (2017b). *Efecto de diferentes métodos de cocción en el contenido de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante en brócoli (Brassica oleracea var. Italica) y coliflor (Brassica oleracea var. Botrytis).* [Universidad Autónoma de Nuevo León]. http://eprints.uanl.mx/id/eprint/14352

Luo, X., Xu, J., Miao, Y., Guo, L., Liu, Y., Fu, J., & Zhang, Y. (2024). Effects of Microwave

Pretreatment on Licorice Cell Structure, Components Content, and Physical Properties. *Journal of Food Biochemistry*, *2024*(1), 8711232. https://doi.org/10.1155/2024/8711232

Marques, M. A., Telis-Romero, J., & Nicoletti Telis, V. R. (2010). Effect of drying method on the adsorption isotherms and isosteric heat of passion fruit pulp powder. *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*, *30*(4), 993–1000. https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000400024

Mostafaei, M., Javadikia, H., & Naderloo, L. (2016). Modeling the effects of ultrasound power and reactor dimension on the biodiesel production yield: Comparison of prediction abilities between response surface methodology (RSM) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Energy*, *115*, 626–636. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.09.028

Mudry, A., & Jackler, R. K. (2021). Tracing the Origins of "Cauliflower Ear" and Its Earlier Names over Two Millenia. *The Laryngoscope*, *131*(4), E1315–E1321. https://doi.org/10.1002/LARY.29055

Nazreen, A. Z., Jai, J., Ali, S. A., & Norasmah, M. M. (2020). Moisture Adsorption Isotherm Model for Edible Food Film Packaging – A Review. *Scientific Research Journal*, *17*(2), 221. https://doi.org/10.24191/srj.v17i2.10160

Oliveira, S. M., Brandão, T. R. S., & Silva, C. L. M. (2016). Influence of Drying Processes and Pretreatments on Nutritional and Bioactive Characteristics of Dried Vegetables: A Review. *Food Engineering Reviews*, *8*(2), 134–163. https://doi.org/10.1007/s12393-015-9124-0

Omaña, M., Cortes, F., Isáza, C., & Garcia, A. (2010). *Isotermas de sorción de agua en residuos de extracción de jugo de naranja*. *627*(506 2), 62–67.

Orrego, C. E. (2003). Procesamiento De Alimentos. In *Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales* (Issue 1). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11607/958932280.pdf

Oyinloye, T. M., & Yoon, W. B. (2020). Effect of Freeze-Drying on Quality and Grinding Process of Food Produce: A Review. *Processes 2020, Vol. 8, Page 354*, *8*(3), 354. https://doi.org/10.3390/PR8030354

Paredes Pozo, S. J. (2012). *Estimación de las isotermas de adsorción y del calor isósterico para zanahoria (Daucus carota L.) deshidratada*. Universidad Nacional "San Luis Gonzaga."

Picchi, V., Fibiani, M., & Lo Scalzo, R. (2020). Cauliflower. *Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables*, 19–32. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00002-7

Poojitha, P., Sathanya, P., Divyadharshini, S., Ishwarya, K., Gowrishankar, L., Abishek, M., Chinmay Hrithik, S Balakrishnaraja, R., & Sureshkumar, J. (2022). Optimization Of Process Parameters for Tray Dried Broccoli Powder for The Development of Protein Rich Pizza Base. *JOURNAL OF ALGEBRAIC STATISTICS*, *13*(2), 1101–1112. https://publishoa.com/index.php/journal/article/view/267

Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J. B., Van Loon, W. K. P., & Van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *85*(11), 1805–1814. https://doi.org/10.1002/JSFA.2140;CTYPE:STRING:JOURNAL

Reyes-Perez, J. J., Murillo-Amador, B., Macias Pettao, R. K., Menacé Almea, M. A., Aragón Sánchez, E., & Palacios-Espinosa, A. (2023). Effect of chitosan on growth and productive parameters in broccoli plants (Brassica oleracea L. var. Calabrese). *Revista de La Facultad de Agronomia*, *40*(3). https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v40.n3.06

Romero Ramírez, M. B. (2024). *Efecto de diferentes pretratamientos biológicos y termofísicos sobre las propiedades antioxidantes de ingredientes en polvo procedentes de tallo de brócoli*. https://riunet.upv.es/handle/10251/209145

Ross, I. A. (2024). The History of Brassicaceae Plants. *Plant-Based Therapeutics, Volume 2*, 1–16. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63681-3_1

Ruthven, D. (1985). Principles of adsorption and adsorption processes. In *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents* (University, Vol. 4, Issue 1). https://doi.org/10.1016/0167-6989(85)90037-6

Saavedra Layza, G. E. (2022). *Efecto de la temperatura en el valor de monocapa de harina de camote (Ipomoea batata L.) variedad amarilla mediante la isoterma de GAB*. Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial.

Sabry, Z. A., Assous, M. T. M., Bahlol, H. E., & El-Desouky, A. I. (2016). Effect of Microwave Pretreatment and Drying Methods on the Carrot Powder Quality. *Middle East Journal of Applied Sciences*, *06*(02), 349–356. https://www.researchgate.net/publication/364197273_Effect_of_Microwave_Pretreatment_and_Drying_Methods_on_the_Carrot_Powder_Quality

Safandowska, M., Makarewicz, C., Rozanski, A., & Idczak, R. (2022). Barrier Properties of Semicrystalline Polylactide: The Role of the Density of the Amorphous Regions. *Macromolecules*, *55*(22), 10077–10089. https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c01490

Sánchez, J. (2020). Estudio y evaluación del potencial alimentario del alga verde Ulva spp. de los esteros Gaditanos. *Tesis Doctoral*, 15–204.

https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=259921

Shinali, T. S., Zhang, Y., Altaf, M., Nsabiyeze, A., Han, Z., Shi, S., & Shang, N. (2024). The Valorization of Wastes and Byproducts from Cruciferous Vegetables: A Review on the Potential Utilization of Cabbage, Cauliflower, and Broccoli Byproducts. In *Foods* (Vol. 13, Issue 8, p. 1163). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/foods13081163

Siomos, A. S., Koularmanis, K., & Tsouvaltzis, P. (2022). The Impacts of the Emerging Climate Change on Broccoli (Brassica oleracea L. var. italica Plenck.) Crop. *Horticulturae 2022, Vol. 8, Page 1032*, *8*(11), 1032. https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8111032

Solano Rodriguez, E. I. (2019). *Efecto de la temperatura en el valor de monocapa de harina de Tocosh de papa (Solanum tuberosum) mediante la isoterma de GAB* [Universidad Nacional de Trujillo]. http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/13383/Solano Rodriguez%2C Edgar Ivan.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR2Th5ttrMog-9jLUPMMnjofbpsL2L9ZMlzgrRamDxX4V4J4UCgARDCvOFc

Spiess, W., Wolf. W. (1987). Critical evaluation of methods to determine moisture sorption isotherms. En Louis, B., Benchot, L. (eds). Water Activity: theory and applications to foods. New York. Marcel Dekker Inc., 215-233.

Srimagal, A. (2016). *Effects of Pre-treatments on Drying Characteristics of Bitter gourd*. http://ethesis.nitrkl.ac.in/8078/%0Ahttp://ethesis.nitrkl.ac.in/8078/1/2016_MTR_614FT3001_A Srimagal.pdf

Syed, R. U., Moni, S. S., Break, M. K. Bin, Khojali, W. M. A., Jafar, M., Alshammari, M. D., Abdelsalam, K., Taymour, S., Alreshidi, K. S. M., Taha, M. M. E., & Mohan, S. (2023). Broccoli: A Multi-Faceted Vegetable for Health: An In-Depth Review of Its Nutritional Attributes, Antimicrobial Abilities, and Anti-inflammatory Properties. *Antibiotics 2023, Vol. 12, Page 1157*, *12*(7), 1157. https://doi.org/10.3390/ANTIBIOTICS12071157

Talens Oliag, P. (2020). Sorción De Agua Un Alimento. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1–8. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83506/Talens - Determinación de la isoterma de sorción de agua un alimento.pdf?sequence=1

Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? *Journal of Food Engineering*, *48*(1), 19–31. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00139-4

Uher, A., Mezeyová, I., Hegedusová, A., & Šlosár, M. (2017). Impact of nutrition on the quality and quantity of cauliflower florets. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, *11*(1), 113–119. https://doi.org/10.5219/723

Valero, T., Rodríguez, P., Ruiz, E., Ávila, J. M., & Varela, G. (2018). La alimentación española: Características nutricionales de los principales alimentos de nuestra dieta. In *La Alimentación Española. Caracteristicas Nutricionales de los Principales Alimetnos de Nuestra Dieta* (Ministerio). https://www.fen.org.es

Vargas, L., Kapoor, R., Nemzer, B., & Feng, H. (2022). Application of different drying methods for evaluation of phytochemical content and physical properties of broccoli, kale, and spinach. *LWT*, *155*, 112892. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112892

Vargas, N. B., & Quispe, K. (2023). *Determinación de las isotermas de adsorción del cacao chuncho (Theobroma cacao L.) seco* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/7784

Vázquez González, C., Mejía, B., & Robles, R. (2020). Impacto de las tecnologías de procesamiento del brócoli sobre compuestos fitoquímicos relevantes en salud humana: una revisión. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, *21*, 3–10. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81365122003

Vélez Duque, P. I., & Álava Murillo, A. (2021). Análisis de los canales de comercialización del brócoli en Ecuador. *Revista Tecnológica - ESPOL*, *33*(3), 181–201. https://doi.org/10.37815/RTE.V33N3.857

Wolf, W., Spiess, W. E. L., & Jung, G. (1985). Standardization of Isotherm Measurements (Cost-Project 90 and 90 BIS). *Properties of Water in Foods*, 661–679. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5103-7_40