



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA EN ENERGÍA -
PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE SECADO DE ALIMENTOS HORTOFRUTÍCOLAS
MEDIANTE LA TEORÍA DE POLANYI PARA UN DESHIDRATADOR DE
BANDEJAS.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
EDUARDO PÉREZ GONZÁLEZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. ELISEO MARTÍNEZ ESPINOSA, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO ABRIL DE 2017

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Salinas Vázquez Martín
Secretario: M. en I. Sánchez Cifuentes Augusto
Vocal: Dr. Martínez Espinosa Eliseo
1^{er.} Suplente: Dra. Rojas Valencia María Neftalí
2^{d o.} Suplente: Dr. Aviña Jiménez Héctor Miguel

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Ciudad de México, edif. 8 del Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS

Dr. Eliseo Martínez Espinosa

FIRMA

Agradecimientos y dedicatorias

Quiero agradecer y al mismo tiempo dedicar este trabajo al Universo por tan maravillosa oportunidad de andar en este sendero de vida, con las personas que han sido pilares en mi desarrollo humano, mis padres y hermano.

A ustedes maestros, quienes predicán su sabiduría con su diario vivir, con su ejemplo y su experiencia. Gracias infinitamente por permitirme encontrar mi camino a la plenitud desarrollándome con gozo y júbilo en mi profesión. Mis padres: P4T1T0 y M4R10.

A mi alma hermana, viviendo su karma a mi lado, no sé si he logrado mi cometido, por el cual decidiste ser mi hermano, pero sin duda has marcado mi alma. Tu amor y nobleza por la vida es tu enseñanza, así como dejar de lado la indiferencia. Mi hermano F3RN4ND0.

A mi otra alma hermana, pero encarnada bajo otro rol diferente, el de la pareja. Simplemente gracias por todo, este logro también es tuyo por todo tu apoyo y paciencia condensados en un solo sentimiento, el cual no ha pasado un solo día que no me lo demuestres, AMOR. Te amo mi M4YR4.

Profundamente agradecido con el Instituto de Ingeniería, particularmente con el Grupo multidisciplinario de trabajo iiDEA, mi segunda casa y familia, conformada por todos mis compañeros, de quien he aprendido y sigo aprendiendo. Gracias H3CT0R, J3SVS, 4LF0NS0, LV1S, R0DR1G0, 1NT1, VR13L, C3S4R, M4RIS3LA, D14N4, M1GV3L 4NG3L, F4B14N, P1K0L1N y LVC3R0. Gracias a mis compañeros de proyecto "DGA": ANDR34, 4LB3RT0 M1GV3L, CH4RLY, R0B3RT, D13G0, 4NT0N10, ya que sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

Gracias a los académicos del Departamento de Alimentos y Biotecnología de la Facultad de Química por su apoyo y colaboración en el proyecto "DGA": Dra. P4TR1C1A, M.E. 0LG4, Q.A. R0C10 y Q.A. Y4ZM1N.

Agradecimiento profundo a mi tutor de tesis Dr. 3L1S30, por su tiempo y dedicación para que culminará este trabajo de la mejor manera posible. A mis sinodales por compartir su experiencia conmigo y haber revisado este trabajo.

Al CeMIE-Geo por su apoyo en la realización de este trabajo.

Finalmente dedico este trabajo a los:
R4R0S, IRR3V3R3NT3S, 3STR4MB0T1C0S 3 1NQU13T0S, porque hacen falta más L1BR3S P3NS4D0R3S, CR1T1C0S y pensamiento 1NF4NT1L, 4VT0D1D4CT4 y CR34T1V0.

P0ř 10\$ 0v3 3l1giñiam0\$ la pıld0řa Ř0J4 en bv\$ca del C0N3J0 BL4NC0.

Contenido

1	FENÓMENOS DE TRANSPORTE	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	ASPECTOS HISTÓRICOS	2
1.2.1	Pioneros de la era experimental	2
1.2.2	Pioneros de la era teórica	2
1.3	FISISORCIÓN Y QUIMISORCIÓN	3
1.4	TERMODINÁMICA DE ADSORCIÓN PARA INTERFACES SÓLIDO-GAS	4
1.4.1	Expresión cuantitativa de la adsorción	4
2	MÉTODO PREDICTIVO PARA LA CINÉTICA DE DESHIDRATADO	9
2.1	ISOTERMAS DE SORCIÓN	11
2.1.1	Modelos de correlación	13
2.1.1.1	Modelo de Freundlich	13
2.1.1.2	Modelo de Langmuir	13
2.1.1.3	Modelo de BET	14
2.1.1.4	Modelo de Dubanin Astakhov (DA)	15
2.1.1.5	Modelo de Dubinin Radushkevich (DR)	15
2.1.1.6	Modelo de Dubinin-Raduskevich Modificado (MDR)	15
2.1.1.7	Modelo de Dent	16
2.1.1.8	Modelo de Subinin-Serpinsky	16
2.1.1.9	Modelo de GAB	16
2.1.1.10	Modelo de Dent modificado	17
2.1.2	Modelo cinético	17
2.1.2.1	Modelo unipore	17
2.1.2.2	Modelo de transferencia lineal LDF	18
2.1.3	Modelo de Predicción	18
2.1.3.1	Teoría de Potencial de Adsorción de Polanyi	18
2.1.4	Calor isostérico	19
2.1.5	Metodología para la construcción de isothermas por el Método de Polanyi y determinación del calor isostérico por el Método de Clausius-Clapeyron	22
3	EFEECTO DEL DESHIDRATADO EN LOS ALIMENTOS DE ORIGEN ORTOFRUTÍCOLA	28
3.1	QUÍMICA DEL JITOMATE (<i>LYCOPERSICUM ESCULENTUM</i>) Y OTROS ALIMENTOS DESHIDRATADOS	28
3.1.1	El calor como método físico para el control microbiano	28
3.1.2	Desnaturalización de la vitamina C	30
3.1.3	Licopeno y la vida de anaquel después de un proceso de deshidratado	37
3.1.4	El <i>Hidroximetilfurfural</i> (HMF) y la <i>Reacción de Maillard</i>	39
3.1.5	Velocidad del aire y su impacto en la calidad nutricional en algunos alimentos	40
3.1.5.1	Cambios en el color	42
3.1.5.2	Encogimiento y porosidad	45
4	PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN DESHIDRATADOR DE ALIMENTOS, PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGÍA	48
4.1	VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE POLANYI	48
4.1.1	Construcción de las Isósteras desortivas a partir de datos experimentales	49
4.1.1.1	Papa, primer caso	49
4.1.1.2	Piña, segundo caso	53
4.2	CAUDAL DEL AIRE	57
5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CONCLUSIONES	62

5.1	RESULTADOS.....	62
5.1.1	Discusión y análisis de las condiciones operativas propuestas.....	64
5.1.1.1	Control microbiano.....	64
5.1.1.2	Desnaturalización de la vitamina C.....	64
5.1.1.3	Pérdida de licopeno.....	64
5.1.1.4	Vida de anaquel y licopeno residual.....	64
5.1.1.5	Producción de Hidroximetilfurfural (HMF).....	65
5.1.1.6	Reacción de Maillard.....	66
5.1.1.7	Cambios en el color.....	66
5.1.1.8	Producción de almidón resistente.....	67
5.1.1.9	Concentración o pérdida de minerales.....	67
5.1.1.10	Encogimiento y Porosidad.....	67
5.2	PROPUESTA FINAL.....	68
5.3	CONCLUSIONES.....	69
5.4	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	69
6	APÉNDICE.....	72
6.1	JITOMATE (<i>LYCOPERSICUM ESCULENTUM</i>) DE KIRANOUDIS.....	72
6.2	JITOMATE (<i>LYCOPERSICUM ESCULENTUM</i>) DE AKANBI.....	73
6.3	PAPA (<i>SOLANUM TUBEROSUM</i>) DE KAYMAK.....	74
6.4	PAPA (<i>SOLANUM TUBEROSUM</i>) DE KIRANOUDIS.....	75
6.5	PAPA (<i>SOLANUM TUBEROSUM</i>) DE MCLAUGHLIN.....	76
6.6	DURAZNO (<i>PRUNUS PERSICA</i>) DE TSAMI.....	77
6.7	DURAZNO (<i>PRUNUS PERSICA</i>) DE KAYMAK.....	78
6.8	ZANAHORIA (<i>DAUCUS CAROTA</i>).....	79
6.9	CEBOLLA (<i>ALLIUM CEPA</i>).....	80
6.10	MANZANA (<i>MALUS DOMESTICA</i>).....	81
6.11	ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DEL TRABAJO DE CORREA ET AL.....	82
6.12	CASO DE ESTUDIO.....	84
7	REFERENCIAS.....	85

Índice de Tablas

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Datos de isotermas para harina de yuca a diferentes temperaturas, calculados a partir de los valores de la CHE a 20 [°C] **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.2 Datos numéricos para generar las isotermas de sorción.... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.3 Datos numéricos para generar las isósteras de sorción **¡Error! Marcador no definido.**

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Compendio de Bacilos patógenos en las enfermedades gastrointestinales**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3.2 Contenido de humedad de algunos productos y temperaturas máximas permisibles;**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3.3 Contenido de vitamina C de diversas frutas y verduras frescas **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3.4 Contenido de licopeno, para jitomate deshidratado, después de haber sido almacenado a 37 [°C]..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3.5 Contenido de almidón resistente y almidón a diferentes temperaturas y velocidades en el proceso de deshidratación **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3.6 Contenido de minerales después de un proceso de deshidratado a 1.25 m/s con diferentes temperaturas **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3.7 Evaluación de color en tejocote deshidratado **¡Error! Marcador no definido.**

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Humedad Relativa para soluciones de ácido sulfúrico a la temperatura de trabajo ..**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4.2 Valores de actividad de agua para diferentes soluciones salinas para tres diferentes temperaturas **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4.3 Datos experimentales para papa analizado por Wang et al. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4.4 Datos experimentales para el jitomate analizado por Akanbi et al ... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4.5 Calor isostérico para diferentes productos, calculado para procesar 10 [kg] de producto fresco, así como el EMR% y **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4.6 Abreviaturas de la Figura 4.6 **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4.7 Flujos máscicos de aire por producto y por temperaturas ambiente registradas por localidad, para una temperatura de proceso de 55 [°C]..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4.8 Energía térmica necesaria a suministrar para cada una de las localidades en función del flujo máscico del aire establecido; temperatura de proceso 55 [°C]; mínimo de energía a alcanzar 24.07 [kW] **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4.9 Energía térmica necesaria a suministrar para cada una de las localidades en función del flujo máscico del aire establecido; temperatura de proceso 55 [°C]; mínimo de energía a alcanzar 12.40 [kW] **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4.10 Información climatológica por localidad **¡Error! Marcador no definido.**

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1 Matriz Analítica de Comparación (MAC) **¡Error! Marcador no definido.**

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1 Validación de los resultados obtenidos por Correa et al. . **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6.2 Característica de diferentes sopladores comerciales **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6.3 Carga térmica calculada para las diferentes localidades, alcanzada con el flujo másico de aire que maneja el equipo, OPCIÓN 4 **¡Error! Marcador no definido.**

Índice de Figuras

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Diferencia entre Adsorción (fisisorción) y Absorción (quimisorción)	4
Figura 1.2 Representación de Gibbs del exceso de cantidad superficial “c” concentración local de gas adsorbible (dn/dV), distancia desde la superficie “z”	6

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua. a) Oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de sorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias.....	10
Figura 2.2 Clasificación de las isotermas de sorción según la IUAPAC	12
Figura 2.3 Isótera de sorción para piña, generada por el autor con los datos de Hossain et al.	21
Figura 2.4 Curva representativa del calor isostérico de la piña.....	21
Figura 2.5 Isotermas experimentales de sorción de harina de yuca a diferentes temperaturas	23
Figura 2.6 La columna que pertenece a las abscisas representa la A_w , mientras que la columna de las ordenadas es el contenido de humedad. Los datos se generaron con el programa GetData Graph Digitizer, versión 2.26.0.20.....	23
Figura 2.7 $-\ln(A_w)$ vs. $1/T$ para el cálculo del calor isostérico en harina de yuca para diferentes valores de la CHE. A este gráfico se le conoce como isóteras desortivas	26
Figura 2.8 Variación del calor isostérico de sorción frente al Contenido de Humedad en Equilibrio de yuca	27

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Porcentaje de la pérdida de ácido ascórbico en función de la temperatura de deshidratación y el espesor de las rebanadas de jitomate.....	32
Figura 3.2 Tiempo de deshidratación en función de la temperatura y espesor de la rebanada de jitomate.....	34
Figura 3.3 Pérdida porcentual de ácido ascórbico en jitomate en función del espesor de la rebanada, de 3[mm] a 32.5 [mm]; La línea punteada representa el posible comportamiento de la pérdida de ácido ascórbico en función del grosor de la rebanada.....	37
Figura 3.4 Porcentaje de vitamina C y licopeno perdido a 80 [°C].....	38
Figura 3.5 Porcentaje de vitamina C y licopeno perdido a 110 [°C].....	38
Figura 3.6 Producción de HMF en el deshidratado de jitomate a 80 [°C] y 110 [°C]	40
Figura 3.7 Escala de color Hunter	43
Figura 3.8 Parámetros de color, para diferentes muestras deshidratadas a diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire 1.3, 0.9 y 0.5 [m/s]; a) Mide el parámetro L^* , la línea roja, indica el valor máximo que tenía el producto fresco 55.51; b) Mide el parámetro de color a^* , entre menor sea el parámetro más cerca de las condiciones frescas estará; c) Mide el parámetro de color b^* , la línea azul indica el valor que tenía el producto fresco 50.49	44
Figura 3.9 Imagen electrónica de rebanadas de cebolla después de 2 [hrs.] de deshidratado para diferentes temperaturas, a) 60 [°C]; b) 70 [°C]	46
Figura 3.10 Imagen de rebanadas de cebolla deshidratadas a 70 [°C] para diferentes tiempos de deshidratado, a) 6 [hrs.]; b) 4 [hrs.].....	46

Figura 3.11 Imagen de tejocotes deshidratados a 1.3 [m/s], para diferentes temperaturas, a) 50 [°C]; b) 70 [°C]	46
--	----

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Isotermas de desorción calculadas con el Método de Polanyi y cotejadas con datos experimentales.....	50
Figura 4.2 Isósteras para papa a partir de los datos calculados.....	51
Figura 4.3 Curva de calor isostérico para la papa, Wang et al.	52
Figura 4.4 Sorción localizada y sus correspondientes niveles de entalpía	53
Figura 4.5 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi (Piña Hossain et al.).....	54
Figura 4.6 Calor isostérico para diversos productos calculado con la ecuación de Clausius Clapeyron	56
Figura 4.7 Comparación de la carga térmica lograda por localidad a diferentes flujos máxicos de aire; para una temperatura de proceso de 55 [°C]	59
Figura 4.8 Demanda de flujo máxico de aire en función de la temperatura de operación (55, 60, 65, 70 [°C]), datos de la Tabla 4.10	60

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 Indicadores de color Hunter. Granada deshidratada (<i>Punica granatum</i>) con microondas a diferentes potencias y aire caliente a diferentes temperaturas, comparados con los parámetros estimados para el producto en su estado fresco.....	66
Figura 5.2 Capacidad de Rehidratación a diferentes temperaturas y velocidades del aire.....	68

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, jitomate (Kiranoudis)	72
Figura 6.2 Curva de calor isostérico jitomate (Kiranoudis) calculado con la ecuación de Clausius- Clapeyron.	73
Figura 6.3 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, jitomate (Akanbi).	73
Figura 6.4 Curva de calor isostérico jitomate (Akanbi) calculado con la ecuación de Clausius- Clapeyron.	74
Figura 6.5 Isotermas de desorción calculadas con Método Polanyi, papa (Kaymak).	74
Figura 6.6 Curva de calor isostérico papa (Kaymak) calculado con la ecuación de Clausius- Clapeyron.	75
Figura 6.7 Isotermas de desorción calculadas con Método Polanyi, papa (Kiranoudis).....	75
Figura 6.8 Curva de calor isostérico papa (Kiranoudis) calculado con la ecuación de Clausius- Clapeyron.	76
Figura 6.9 Isotermas de desorción calculadas con Método Polanyi, papa (McLaughlin).....	76
Figura 6.10 Curva de calor isostérico papa (McLaughlin) calculado con la ecuación de Clausius- Clapeyron.	77
Figura 6.11 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, durazno (Tsami)	77
Figura 6.12 Curva de calor isostérico durazno (Tsami) calculado con la ecuación de Clausius- Clapeyron.	78
Figura 6.13 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, durazno (Kaymak)	78
Figura 6.14 Curva de calor isostérico durazno (Kaymak) calculado con la ecuación de Clausius- Clapeyron.	79
Figura 6.15 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, zanahoria.	79
Figura 6.16 Curva de calor isostérico zanahoria calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.80	
Figura 6.17 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, cebolla.	80
Figura 6.18 Curva de calor isostérico cebolla calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron....	81
Figura 6.19 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, manzana.....	81
Figura 6.20 Curva de calor isostérico manzana calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron. 82	

Resumen

La deshidratación de alimentos como método de conservación, representa una alternativa práctica y saludable para conservarlos por más tiempo. Actualmente, esta práctica ha ido más allá de un simple método de conservación; el consumo de los alimentos de origen hortofrutícola, se ha incrementado en todo el mundo. Los datos del mercado de deshidratados muestran una tendencia creciente del 59% en el consumo, en comparación al 2006, mientras que la producción ha aumentado en los últimos dos años en un 52% [1]. Debido a que el consumo tiene un crecimiento ligeramente más acelerado que la producción, se considera que existe una oportunidad para desarrollar un buen mercado.

Los principales países importadores de fruta deshidratada son Alemania con el 10%, Inglaterra con un 9.5%, Estados Unidos con 8.3% y de los países restantes con 72.2% de las importaciones mundiales, mientras que México sólo importa el 1.9%. Por otra parte, los principales países exportadores son Turquía con 16%, Chile con 12% y Estados Unidos con 11%, mientras que México aún no figura dentro del top 10 de los países que encabezan dicha lista, siendo Argentina el décimo país con el 2% de las exportaciones mundiales.

En este sentido, México frente a Argentina, tuvo mayor diversidad en producción hortofrutícola, con 4.4 [Ton] de naranja, 3.3 [Ton] de jitomate, 2.3 [Ton] de Chile, 2.1 [Ton] de Limones y plátanos y 1.9 [Ton] de mangos y guayabas en 2013 [2].

El sistema deshidratador que se propone, es de bandejas y convección forzada. El agua del alimento es removida a través de fenómenos desortivos, los cuales están asociados a la transferencia de calor y masa. Es fundamental tener control de este proceso deshidratador, ya que analizado desde el punto de vista de la termodinámica, el objetivo que se pretende, es mejorar los coeficientes de transferencia de calor asociados a la temperatura y velocidad del aire, así como la distribución de las rebanadas en las bandejas, homogeneidad en el flujo de aire a través de la cámara de deshidratado, así como el ángulo de incidencia del aire a través de los bloques de las bandejas. Sin embargo, desde el punto de vista de la química de alimentos, en sus dos disciplinas, caracterizaciones sensoriales y seguridad alimentaria, el proceso de deshidratación debe sujetarse a ciertos parámetros operativos. Como se explica en este trabajo, las reacciones químicas asociadas con la interacción de compuestos bioactivos con el calor, el aire, la humedad, la luz, los compuestos químicos de los materiales con los que están en contacto y por supuesto agentes patógenos presentes en nuestro alrededor, hacen de este proceso uno interesante y nada trivial de estudiar.

Los fenómenos de transporte están presentes en la mayoría de las actividades que rigen la vida diaria, por esta razón su estudio ha sido de gran relevancia a lo largo de la historia. En el capítulo uno se explica quiénes fueron los pioneros en el estudio de los fenómenos de transporte, enfocados en los fenómenos adsortivos, absortivos y desortivos. Dependiendo de la naturaleza del material y sus propiedades físicas fue necesario desarrollar modelos predictivos que describieran el comportamiento de dichos procesos asociados a su interacción con diferentes fluidos; en el capítulo dos se describe cada uno de los modelos de correlación

desarrollados y los cuales siguen siendo utilizados para corroborar resultados experimentales; al final de dicho capítulo se presenta un método novedoso, planteado por Correa [3] en su tesis doctoral, el cual consiste en un modelo predictivo para fenómenos sortivos con aplicación en procesos de adsorción para refrigeración y calefacción de espacios en Colombia, tierra natal del autor.

Para determinar los parámetros operativos del proceso de deshidratación, en el capítulo tres se plantean cada una de las afecciones y transformaciones de la materia inherentes al proceso. Paralelamente a este estudio en el capítulo cuatro se hace la validación del método empleado por Correa, pero orientado a la cinética de deshidratación de productos alimenticios, particularmente productos hortofrutícolas.

La cuantificación de la energía requerida para llevar a cabo un proceso es, sin lugar a dudas, de suma importancia en nuestros días. Dicha estimación nos permitirá conocer parte de los costos y en consecuencia la factibilidad técnico-económica del proyecto. Con el método planteado por Correa validado, se podrá analizar con mayor rapidez y practicidad alimentos de los cuales no se tengan registros, y si bien ya existen dichos registros en la literatura, debe tomarse en cuenta que las condiciones organolépticas entre especies cambian, así como cambian las condiciones de una misma especie, pero procedente de diferentes puntos geográficos.

En el capítulo cinco, todo se consuma en una **Matriz Analítica de Comparación (MAC)**, herramienta desarrollada para generar condiciones de deshidratado según convengan en los diferentes procesos de deshidratación.

Las razones que le dieron origen a este proyecto están fundamentadas en la necesidad de un método efectivo de conservación de alimentos, debido al desperdicio del 37% de alimentos en nuestro país [4]. Los deshidratadores que existen actualmente operan con gas L.P., por ejemplo producen 1,300 [kg] de mango deshidratado diario y consumen dos tanques de gas L.P. de 3,700 [litros] cada uno a la semana.

Respecto a las energías renovables, la energía geotérmica se perfila como una alternativa eficiente para la producción de alimentos deshidratados, debido a la eliminación de las emisiones de dióxido de carbono. México tiene un potencial instalado en usos directos geotérmicos de 1,158.70 [GWh/año] [5]; lamentablemente sólo se limita a la balneología debido a la falta de conocimiento sobre características y usos potenciales de este recurso.

Por esta razón el Instituto de Ingeniería de la UNAM, a través del grupo iiDEA (Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas), preocupados por impulsar el desarrollo de las aplicaciones de usos directos, están desarrollando tecnología mexicana, para el aprovechamiento del calor remanente del subsuelo en procesos como la deshidratación de alimentos, entre otros.

Objetivos

Objetivo General.

Determinar los parámetros de diseño de un deshidratador de bandejas para alimentos del tipo hortofrutícola.

Objetivos Particulares.

1. Generar una metodología de análisis para determinar la carga térmica del deshidratado en diferentes regiones y para diversos alimentos.
2. Determinar los efectos de la deshidratación en productos hortofrutícolas, para proponer condiciones de proceso orientadas a generar productos nutritivos y seguros.
3. Validación del Método de Polanyi aplicado a procesos desortivos en alimentos.
4. Generar una herramienta de análisis para los parámetros operativos y su aplicación en deshidratado de diferentes productos de acuerdo a las características particulares del proyecto.

1 FENÓMENOS DE TRANSPORTE

1.1 Introducción

A través de la historia, el desarrollo de la física clásica ha traído como consecuencia la derivación de diversas ramas de estudio, pero algunas surgieron de manera independiente pese a que dichas áreas se han constituido en un área fundamental de las ciencias de la ingeniería como la transferencia de cantidad de movimiento, la transmisión de calor y la transferencia de materia, las cuales actualmente abarcan campos como la biotecnología, microelectrónica, nanotecnología y la ciencia de polímeros.

Debido a la rápida evolución de los fenómenos de transporte y el surgimiento de varias disciplinas de estudio, abordar todo el tema sería una tarea titánica. Por esta razón se ha delimitado el marco teórico al transporte de materia en medios porosos.

Los medios porosos son importantes en muchas aplicaciones de transferencia de materia, como la catálisis. Sin embargo, los procesos de adsorción como la cromatografía suelen llevarse a cabo en lechos granulares, y las mismas partículas absorbentes a menudo son sólidos porosos [6]. Como este tipo de aplicaciones hay otras que también se manejan bajo fenómenos de adsorción como los fenómenos naturales de superficie, los cuales son considerados como los más relevantes dentro de la actividad humana, ya que su aplicación tiene una gran relevancia en el desarrollo de operaciones y procesos en la industria química, en laboratorios y en el campo académico y de investigación. Múltiples aplicaciones de fenómenos de adsorción se hacen evidentes a través de procesos como:

- Recuperación de vapores orgánicos por adsorción sobre carbón
- Extracción de la cafeína de los granos de café
- Separación de los hidrocarburos aromáticos y alifáticos por adsorción selectiva sobre gel de sílice
- Recuperación secundaria de petróleo crudo
- Deshidratado de alimentos y productos farmacéuticos
- Sistemas de control de emisiones contaminantes al ambiente, como en el caso de los convertidores catalíticos de automóviles
- Refrigeración por adsorción
- Purificación de proteínas en biotecnología moderna
- Tratamiento de sólidos en solución acuosa
- Procesos de purificación de gases y líquidos, por ejemplo, tratamiento de agua y aceites.

En la actualidad muchas de estas aplicaciones se han extendido a través de áreas de innovación tecnológica, sorprendentemente no por el desarrollo en la ciencia, sino más bien por el desarrollo de actividades artísticas y/o artesanales [7]. La comprensión de los fenómenos básicos no es trivial, debido a que el estudio de las interfaces que interactúan en

los procesos requiere de experimentación cuidadosa. En los últimos años, se han incrementado los esfuerzos por cerrar la brecha entre los resultados experimentales y teóricos y como consecuencia, se han desarrollado aproximaciones teóricas a nivel molecular que ayudan a modelar los fenómenos adsorptivos-desorptivos a través de modelos computacionales y así examinar las capas superficiales o interfaciales de las regiones involucradas. Por esta razón en poco más de quince años se han logrado fabricar nuevos materiales adsorbentes como es el caso de la fibra de carbón activado [7].

1.2 Aspectos Históricos

1.2.1 Pioneros de la era experimental

Aunque ciertos fenómenos asociados con la adsorción fueron descubiertos desde la antigüedad, las primeras observaciones cuantitativas de los hechos fueron practicadas por Scheele [7] en 1773 y Fontana [7] en 1777, quienes reportaron la absorción de gases por carbón vegetal y arcilla. Con el paso del tiempo las aplicaciones modernas se han basado en las observaciones de Lowitz, quién por medio del carbón vegetal decoloró soluciones de ácido tartárico¹ como resultado de la absorción de impurezas orgánicas. Posteriormente, estudios sistemáticos acerca de la adsorción hechos por Saussure [7, 8] en 1814, permitieron hacer dos importantes distinciones, la primera fue sobre la facilidad de adsorción que tienen los materiales porosos sobre sustancias gaseosas fácilmente condensables y la segunda que dichas reacciones son exotérmicas.

El término de *adsorción* fue propuesto por du Bois-Reymond, pero fue introducido a la literatura por Kayser [7], quién desarrolló conceptos básicos teóricos para describir la teoría de adsorción monomolecular. Durante los siguientes años los términos de *isoterma* y *curva isotérmica* fueron empleados para describir los resultados de adsorción registrados a temperatura constante. Para 1909, el término de *absorción* fue introducido por McBain [7], con la intención de determinar un proceso de absorción mucho más lento de hidrógeno por medio de carbón respecto a la adsorción.

1.2.2 Pioneros de la era teórica

Las ecuaciones isotérmicas relacionadas con la física de gases y vapores, proporcionan información relevante sobre las características más importantes de los adsorbentes como: el volumen y tamaño del poro, la distribución de la energía y el área de superficie específica, de tal manera que la interpretación correcta de las isotermas experimentales de adsorción se puede hacer en términos de sus ecuaciones matemáticas. Dichas ecuaciones se derivan de la estrecha relación con los modelos físicos del sistema adsorción-desorción, quienes a su vez se derivan de los resultados experimentales de una hipótesis sobre el carácter del proceso de

¹ El ácido tartárico es un compuesto orgánico polifuncional; comúnmente se utiliza como acidificante y conservante natural (E-334). Muchos de los ácidos se encuentran de manera natural en diversos vegetales como parte de su metabolismo y contribuyen a la acidez y al sabor típico. Por ejemplo: el aguacate, uvas y toronjas son ricos en ácido tartárico. En la industria enológica es utilizado como corrector de la acidez del vino o se emplea en la elaboración de bebidas efervescentes como gaseosas [11].

adsorción. Los resultados experimentales permiten la formulación de hipótesis que sistemáticamente son puestas a prueba con nuevos experimentos perfectamente diseñados, por lo que después de ciertas iteraciones, si una hipótesis no puede ser desacreditada se da pie al desarrollo de una teoría; es decir, una ecuación de adsorción adecuada. Dichas teorías siempre son puestas a prueba y han servido como guías para nuevos experimentos. Es pues, la ciencia de la adsorción, una ciencia que se ha desarrollado a través de métodos empíricos estrechamente relacionados con la generación de hipótesis y su posterior comprobación experimental.

Hasta antes de 1914 no había una teoría que modelara satisfactoriamente los fenómenos adsorptivos-desorptivos o al menos eso se creía, ya que Boedecker desarrolló una ecuación empírica en 1895, pero no sería tomada en cuenta hasta principios del siglo XX por Freundlich, quien logró popularizarla en el modelado de dichos fenómenos. Por esta razón a esta ecuación se le conoce como la ecuación de Freundlich [7]. Posteriormente en 1918, la teoría de adsorción fue desarrollada por Langmuir [3], al considerar que la superficie del adsorbente contiene un número fijo de lugares de adsorción y cada lugar puede absorber una sola molécula. La adsorción puede ser dividida en dos: La adsorción química (irreversible o *quimisorción*), y la adsorción física (*fisisorción*), en donde los mecanismos están en función del tipo de enlaces que formen entre el adsorbato y el adsorbente.

1.3 Fisisorción y Quimisorción

La fisisorción se caracteriza por enlaces del tipo Van der Waals y dipolares, generalmente son considerados como enlaces débiles comparados con los enlaces químicos. En este fenómeno los calores de adsorción son bajos y es un proceso irreversible que se da superficialmente, en donde las moléculas del adsorbato no están restringidas a sitios puntuales, es decir, tienen libertad de cubrir toda la superficie total del adsorbente y se originan por la atracción entre dipolos permanentes o inducidos sin alteración de orbitales atómicos o moleculares de las especies involucradas. Debido a los enlaces que forma también se le conoce a la fisisorción como “adsorción de Van der Waals” y puede considerarse como la condensación del gas en la superficie del sólido, semejante a la condensación de un vapor.

En contra parte con los enlaces débiles de la fisisorción, la quimisorción es una relación más fuerte entre el adsorbato y el adsorbente, los enlaces son del tipo iónico o covalentes; como su nombre lo dice el fenómeno se da a un nivel más interno dentro de la materia. Los electrones de enlace entre el gas y el sólido experimentan un reordenamiento, donde los orbitales respectivos cambian de forma o grado de ocupación de modo semejante a una reacción química. Los calores de adsorción son elevados, el proceso es irreversible y el fenómeno de adsorción sólo es posible en monocapas.

Para discernir sobre el tipo de fenómeno que se presenta, se recurren a criterios experimentales. Uno de ellos es la medición de la magnitud del calor de adsorción, el cual se ha tomado como un criterio que permite discriminar entre un fenómeno y otro, es decir, si el calor de adsorción medido es de 42 [kJ/mol] entonces se dice que es fisisorción, mientras

que, si el valor medido es de 84 [kJ/mol] el fenómeno es quimisorción, y la zona intermedia se ha considerado incierta.

En resumen la fisisorción es un fenómeno superficial, mientras que la quimisorción, es un fenómeno de fronteras adentro del sistema en estudio, como se muestra en la *Figura 1.1*.

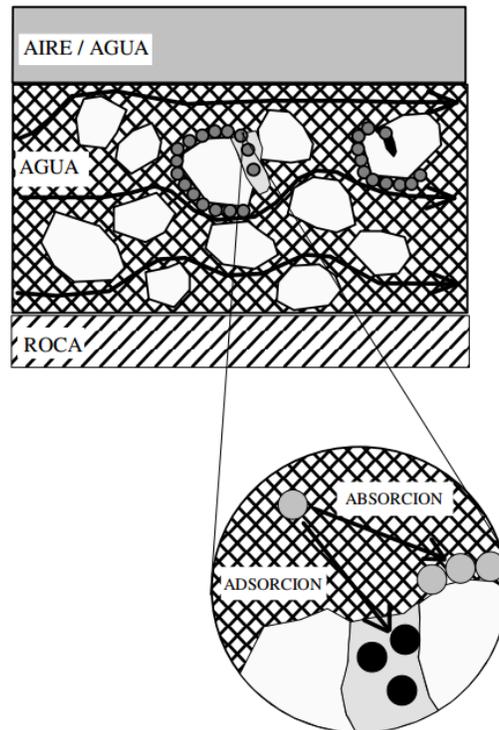


Figura 1.1 Diferencia entre Adsorción y Absorción [9]

1.4 Termodinámica de adsorción para interfaces sólido-gas

Los mayores avances en la aplicación de la termodinámica clásica para la adsorción de gases fueron desarrollados varios años atrás. Particularmente los trabajos de Guggenheim (1933, 1940), Hill (1947, 1952), Defay and Prigogine (1951) y Everett (1950, 1972), propiciaron un mejor entendimiento de los principios fundamentales asociados a la termodinámica aplicada para varios sistemas de adsorción.

1.4.1 Expresión cuantitativa de la adsorción

Supóngase una superficie genérica de un adsorbente cualquiera, donde la concentración, $c = dn/dV$, decrece progresivamente al mismo tiempo que aumenta la distancia “z” desde la superficie del adsorbente; cuando la distancia $z=t$ (donde t es el espesor), se dice que la concentración será constante, definiendo la fase gaseosa como c^g . La variación hipotética

sobre dicha concentración se ilustra en la *Figura 1.2a* donde se pueden apreciar tres zonas (I, II, III). Se asume que no hay penetración del gas dentro del sólido, es decir, descartamos los fenómenos adsorptivos, por lo que la zona I sólo está ocupada por el adsorbente $c^s=0$. En la zona III, el gas adsorbible o adsorbato, guarda cierta distancia del sólido que le impide tener una concentración uniforme “ c^g ” con una distancia $z>t$. En esta sección la concentración del gas sólo dependerá del equilibrio de presión y temperatura; La zona II representa a la capa adsorbente, la cual es una región intermedia confinada entre los límites $z=0$ y $z=t$. Justo aquí, la concentración, c , es más alta que la concentración del gas en la zona III y es inversamente dependiente de z .

Con el análisis de la misma imagen, el volumen de V^a , de la capa adsorbente puede expresarse como el producto del área “ A ” por el espesor “ t ”, ver *Ecuación 1*.

$$V^a = At \tag{Ecuación 1}$$

La cantidad adsorbida “ n^a ” se define como:

$$\begin{aligned} n^a &= \int_0^{V^a} c dV \\ &= A \int_0^t c dz \end{aligned} \tag{Ecuación 2}$$

En donde la *Figura 1.2a* “ n^a ” es equivalente al achurado representado por el área ($d+e$). La cantidad total, n , del total del adsorbato del sistema puede dividirse en dos partes, la cantidad adsorbida y la cantidad de sustancia en fase gaseosa:

$$n = A \int_0^t c dz + c^g V^g \tag{Ecuación 3}$$

de la *Ecuación 2* sustituyendo en la *Ecuación 3* y despejando n^a

$$n^a = n - c^g V^g \tag{Ecuación 4}$$

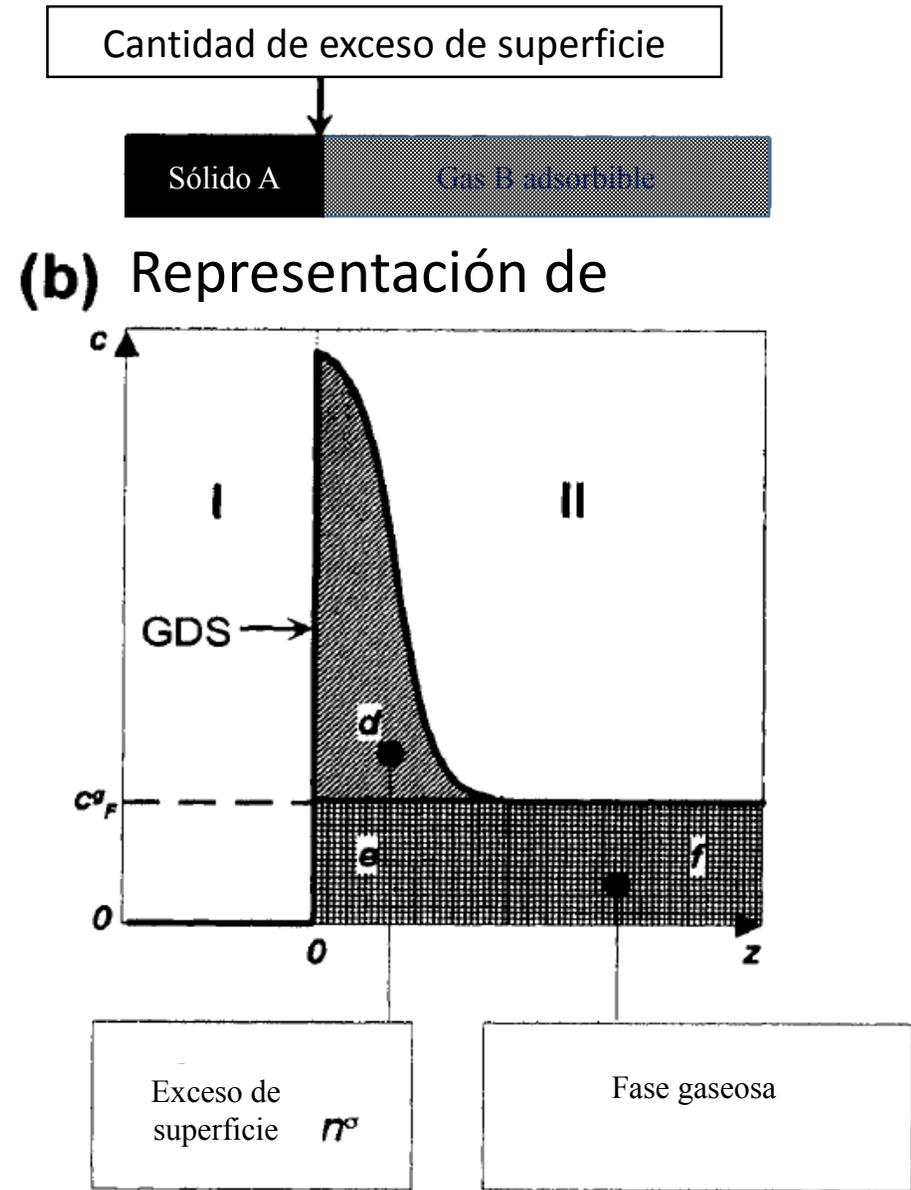
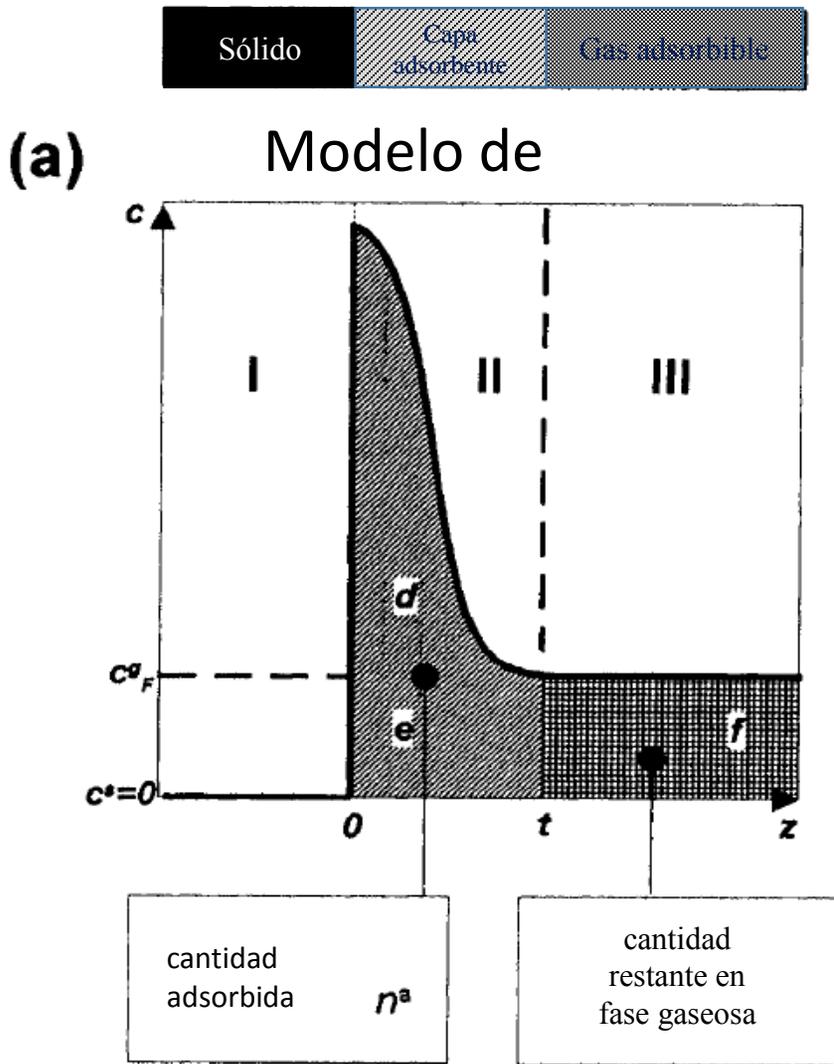


Figura 1.2 Representación de Gibbs del exceso de cantidad superficial " c " concentración local de gas adsorbible (dn/dV), distancia desde la superficie [10] " z "

Es evidente que para determinar el valor exacto de la cantidad adsorbida “ n^a ”, bastaría con conocer el valor exacto del volumen en la fase gaseosa “ V^g ” o la variación de la concentración local “ c ” respecto a “ z ”. En la práctica esto no es fácil de estimar [10] y en consecuencia, en 1877 Gibbs decide abordar el problema con una aproximación alternativa basada en un concepto denominado *exceso superficial*, de esta manera cuantificó la cantidad adsorbida. La comparación es a través de un nuevo sistema de referencia, el cual se divide en dos zonas (“A” asociada al volumen “ $V^{s,o}$ ” y “B” asociada al volumen “ $V^{g,o}$ ”) con la ayuda de una superficie imaginaria, denominada *Superficie Divisoria de Gibbs* o GDS, por sus siglas en inglés, colocada paralela a la superficie del adsorbente. De tal manera que ahora el sistema de referencia ocupa el mismo volumen que el sistema real, por lo que:

$$V = V^{s,o} + V^{g,o} = V^s + V^a + V^g$$

El exceso superficial “ n^σ ” está representado por el área achurada “ d ” ver *Figura 1.2b*, la cual se define como la diferencia entre el total adsorbido “ n ”, menos la cantidad adsorbida representada por el área achurada $e+f$ y representada, a su vez, por el volumen $V^{s,o}$.

$$n^\sigma = n - c^g V^{g,o} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dado que $V^{s,o} = V^a + V^s$ sustituyendo en la *Ecuación 5* y multiplicado por “ c^g ” y combinando la *Ecuación 4*, se llega a la siguiente expresión:

$$n^a = n^\sigma + c^g V^a \quad \text{Ecuación 6}$$

De la *Figura 1.2b* el exceso superficial “ n^σ ” está representado por el área achurada d ; mientras que la cantidad adsorbida “ n^a ” está representada por $(d+e)$.

Experimentalmente se ha determinado que el volumen V^a es despreciable al volumen V^g [10], por lo que:

$$n^a \approx n^\sigma \quad \text{Ecuación 7}$$

Las cantidades n^a y n^σ son cantidades extensivas, las cuales dependen de la extensión de la interface. Por el contrario, el *exceso superficial de concentración* “ Γ ” es una cantidad intensiva

$$\Gamma = n^\sigma / A \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde A es el área superficial y está asociada con la masa del adsorbente “ m ”; de donde se desprende el siguiente concepto *superficie específica*, definida como:

$$a = A / m^s \quad \text{Ecuación 9}$$

usualmente se mide y registra el *exceso superficial específico*, n^σ/m^s :

$$n^\sigma/m^s = \Gamma_a \quad \text{Ecuación 10}$$

esta expresión es dependiente del equilibrio de presión, “ P ” y de la temperatura del adsorbente “ T ” Comúnmente en la práctica a esta expresión se le conoce como isoterma de sorción.

$$n^\sigma/m^s = f(P)_T \quad \text{Ecuación 11}$$

2 MÉTODO PREDICTIVO PARA LA CINÉTICA DE DESHIDRATADO

Las aplicaciones donde intervienen fenómenos de transporte de masa debido a un proceso de deshidratado de sólidos o por fenómenos de adsorción-desorción son muy variados; el objetivo de este trabajo es estudiar y analizar dichos fenómenos enfocados a la deshidratación de alimentos.

El agua contenida en los alimentos juega un papel fundamental en diversos aspectos relacionados con la industria alimentaria y el campo del desarrollo e investigación en alimentos. La estabilidad del alimento depende en gran medida de su contenido de agua, ya que ésta es necesaria para el crecimiento microbiano y para que se efectúen reacciones tanto indeseables como deseables (enzimáticas, de oscurecimiento, rancidez hidrolítica, desnaturalización de proteínas y rancidez oxidativa, estas dos últimas causadas por la disminución de humedad en el alimento). De esta manera se propone el deshidratado de alimentos como una alternativa para la conservación de los mismos, teniendo como ejemplo una serie de alimentos orgánicos cien por ciento libres de conservadores.

Como se explicó anteriormente la distribución del agua en el alimento no es homogénea, puede encontrarse como agua libre o agua ligada. El agua libre es aquella que está más accesible, por lo regular contenida en los macroporos del alimento, dicha agua sirve como medio para las reacciones y el crecimiento microbiano, durante el proceso de deshidratación es la primera que se libera, se estima que está agrupada alrededor de la superficie del sólido bajo una estructura de monocapas, a ésta aglomeración de agua se le conoce como “*Actividad de agua*” (A_w) o agua libre, ya que a diferencia del agua ligada no está unida al sólido por medio de puentes de hidrógeno². El objetivo del deshidratado de alimentos es que por medio de fenómenos desortivos, se remueva el contenido de humedad o agua libre, retardando así el deterioro del alimento.

Debido a la distribución irregular del agua en el tejido alimenticio, se desarrolló una representación gráfica de su distribución, clasificándola por zonas (*Figura 2.1*) el objetivo es mostrar las tres zonas hipotéticas en que se divide el contenido de agua en un producto. La zona III se considera agua libre, por ser más abundante, fácil de evaporar y congelar, su eliminación reduce la A_w a 0.8. En la zona II, el agua se ubica en diferentes capas más estructuradas y en microcapilares, es más difícil de eliminar que la anterior pero al lograrlo se llegan a valores de A_w de alrededor de 0.25. Esta fracción correspondería junto con la monocapa, al agua “ligada”. Finalmente, el agua de la zona I equivale a la capa monomolecular y es la más difícil de eliminar en los procesos comerciales de deshidratación,

² Algunos investigadores consideran que el “agua ligada” no tiene relación alguna con dichos puentes de hidrógeno, sino más bien es el agua que está físicamente atrapada en una matriz muy viscosa que no permite su movilidad y difusión y, por lo tanto, no está disponible [11]. En la remoción del agua ligada intervienen procesos como la quimisorción.

pese a que puede ser reducida parcialmente no se recomienda ya que se requiere de mucha energía y se daña el alimento³.

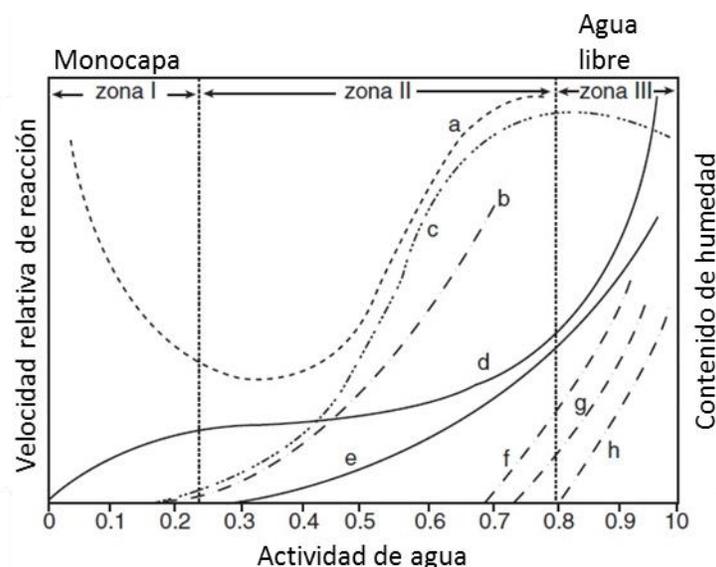


Figura 2.1 Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua. a) Oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de sorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias [11]

En conclusión las propiedades coligativas, organolépticas y fisicoquímicas (reológicas, de textura, reacciones físicas, químicas, enzimáticas y microbiológicas) de un alimento dependen del porcentaje del Contenido de Humedad en Equilibrio (CHE), es preciso mencionar que dicho valor, corresponde a la Humedad Relativa (HR) del entorno, registrada al concluir el equilibrio de humedad entre el ambiente y el alimento. El conocimiento de la relación de la A_w y la CHE de los alimentos, es importante para predecir los cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas que ocurren durante el almacenamiento y transformación. La CHE se estima con la medición del A_w .

$$A_w = \frac{f}{f^0} = \frac{P}{P_0} = \frac{HR}{100} = \frac{M_a}{M_a + M_s} \quad \text{Ecuación 12}$$

donde:

f : fugacidad del disolvente de la solución

³ El daño al alimento estriba en la oxidación lipídica, la cual se detona por dos mecanismos; el primero está asociado a altas cantidades de A_w , debido al favorecimiento de la hidratación de catalizadores metálicos y a la “pro-oxidación” que es la propagación de reactantes por fenómenos difusivos a través del alimento. El segundo mecanismo se asocia con bajos contenido de A_w por debajo del nivel de la monocapa, si se retira la última capa de agua se estaría retirando una barrera natural contra el efecto oxidante del oxígeno presente en el aire que rodea al alimento [11].

f° : fugacidad del disolvente puro

HR : humedad relativa

P : presión de vapor del agua del alimento a la temperatura del proceso.

P_0 : presión de vapor de agua pura a la temperatura del proceso.

M_s : moles de soluto [g/pm]

M_a : moles de agua [g/18]

P/P_0 : presión de vapor relativa

Pese a que la A_w se relaciona con la fugacidad o la presión de vapor relativa como medida más exacta del A_w , resulta más práctico medirla directamente por sus beneficios prácticos, por la facilidad de su medición y por el bajo costo de los equipos requeridos. La Secretaría de Salud de México (SSA), la FDA de Estados Unidos y la Comunidad Económica Europea, la usan para categorizar la seguridad de los alimentos; los estudios de Análisis de Riesgos y Control de Puntos Críticos (HACCP, de las siglas en inglés *Hazard Analysis and Critical Control Points*), generalmente la consideran como un punto crítico. Por tal motivo la importancia del contenido de humedad en los alimentos resulta de gran interés para el campo de los alimentos en sus áreas tanto de investigación como industrial.

Determinar el contenido de humedad se logra por medio de los estudios de los fenómenos adsorptivos-desorptivos en los productos alimenticios; la mejor manera para estudiar estos fenómenos es a través de las curvas o isotermas de sorción.

2.1 Isotermas de sorción

Una de las formas de representar el equilibrio de adsorción es mediante la relación entre la cantidad adsorbida (A_w) y la presión (CHE) a una determinada temperatura. Esta relación es conocida como isoterma de sorción de vapor de agua, que hace referencia a procesos de adsorción (hidratación o rehidratación) o de desorción (deshidratación). Dichas curvas tienen diferente comportamiento, el cual está en función del material adsorbente y/o de las reacciones químicas presentes.

La siguiente clasificación es propuesta por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) [8] basada en la clasificación que propusieron Brunnauer, Deming y Teller en 1938 [12].

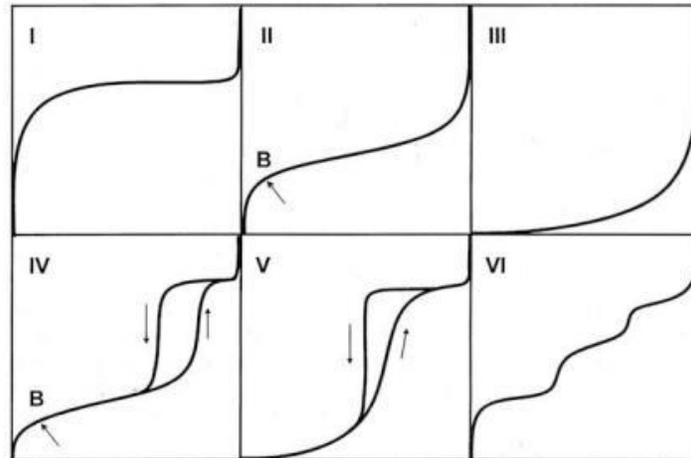


Figura 2.2 Clasificación de las isothermas de sorción según la IUAPAC [3, 12]

Tipo I: Corresponde a la isoterma de Langmuir, que describe la adsorción monomolecular o adsorción en monocapa para la fisisorción o quimisorción de gas sobre un sólido poroso, específicamente hablando materiales microporosos.

Tipo II: Es la isoterma conocida como sigmoide, característica de productos solubles, muestra una tendencia asintótica conforme la A_w se acerca a la unidad; se presenta en materiales no porosos o macroporosos. Representa una adsorción en monocapa o multicapa sin restricciones. El punto B indica el valor de la presión relativa donde la adsorción por monocapa ha culminado e iniciado la adsorción en multicapa.

Tipo III: También conocida como la isoterma de Flory-Huggings, se encuentra en la adsorción de un disolvente o plastificante como el glicerol; este tipo de isoterma se presenta en materiales no porosos o macroporosos cuando existe poca afinidad entre el adsorbato y el adsorbente, por tanto, a presiones relativas bajas el efecto del campo de fuerzas no se observa (una pendiente baja) debido a las interacciones débiles entre la pareja adsortiva.

Tipo IV: La isoterma del tipo IV muestra la adsorción por un sólido hidrófilo “inchable”, hasta que alcanza el máximo de sitios de hidratación; presenta un ciclo de histéresis, el cual se asocia con la condensación capilar propia de la adsorción/desorción en mesoporos, y un valor límite en la cantidad adsorbida para el intervalo superior de presión relativa. La parte inicial de la isoterma se atribuye a la adsorción en monocapa, puesto que coincide con la primera región de la isoterma de tipo II. Este tipo de isoterma se presenta en los materiales adsorbentes mesoporosos.

Tipo V: Llamada como isoterma BET por Brunauer, Emmett y Teller, que representa la adsorción multimolecular observada en la adsorción de vapor de agua sobre carbón; se presenta en materiales mesoporosos debido a la presencia de histéresis en el proceso. Existe poca afinidad entre el adsorbato y el adsorbente. Esta isoterma es muy poco frecuente.

Tipo VI: Esta isoterma representa la adsorción escalonada en multicapa sobre una superficie uniforme no porosa. Cada uno de los escalones que presenta corresponde a una capa adsorbida. Suele presentarse por ejemplo, en la adsorción de Argón a la temperatura del nitrógeno líquido (77 [K]) sobre negro de humo grafitizado.

Los perfiles de isothermas más frecuentes en alimentos son los tipo II, III y IV [13, 8, 14]. Para ajustar las curvas o isothermas experimentales se han propuesto varios modelos matemáticos.

2.1.1 Modelos de correlación

Existen diversas teorías implicadas en el análisis del equilibrio de adsorción, expresadas en modelos que son correlaciones para la generación de isothermas empíricas utilizadas actualmente.

2.1.1.1 Modelo de Freundlich

Es una de las isothermas propuesta a finales del siglo XIX, y está representada por la siguiente ecuación

$$\theta = kP^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación 13}$$

La *Ecuación 13* se puede derivar teóricamente suponiendo que la superficie contiene diferentes tipos de centros de adsorción. Los parámetros de ajuste k y n son constantes (normalmente se encuentran entre 1 y 10); se pueden obtener del ajuste lineal de la expresión en forma logarítmica, al representar gráficamente $\ln(\theta)$ vs. $\ln(P)$, donde la pendiente representa a n y la ordenada al origen está representada por k . Esta isoterma se utiliza comúnmente para describir el equilibrio de sorción-gas; sin embargo, presenta una limitante a presiones altas pero es más precisa que la de Langmuir a presiones moderadas.

2.1.1.2 Modelo de Langmuir

En 1916, Irvin Langmuir publicó un modelo para la isoterma de los gases adsorbidos en los sólidos, que lleva su nombre. Se trata de una isoterma empírica basada en las siguientes suposiciones:

- La superficie del adsorbente es uniforme, es decir, todos los sitios de adsorción son iguales.
- Su adsorción es independiente de la ocupación de las posiciones vecinas (las moléculas adsorción no interaccionan lateralmente).
- Toda la adsorción se produce a través del mismo mecanismo.
- En la adsorción máxima sólo una *monocapa* está formada, es decir, las moléculas de adsorción no se depositan en otras moléculas ya absorbidas, sólo se depositan en la superficie libre del adsorbente.

Considerando una cinética de primer orden respecto al proceso de adsorción, se determina que la velocidad de adsorción será proporcional al número de colisiones entre moléculas asociadas a la fase gaseosa, la isoterma de Langmuir se puede expresar como:

$$\theta = \left(\frac{KP}{1+KP} \right) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde $K=k_a/k_d$, (k_a es la constante de velocidad para la adsorción y k_d la constante de velocidad para la desorción). La isoterma de Langmuir puede linealizarse para determinar los parámetros del modelo y así realmente esta teoría reproduce correctamente el comportamiento experimental del equilibrio de sorción.

2.1.1.3 Modelo de BET

Cabe mencionar que la isoterma de Langmuir no toma en cuenta la posibilidad de formación de *multicapas*, por lo que la isoterma más usada para analizar este fenómeno es la desarrollada por S. Brunauer, P. Emmett y E. Teller, denominada isoterma de BET; a partir de las siguientes consideraciones [8]:

- Todos los centros de adsorción de la superficie son equivalentes.
- La capacidad de adsorción de un centro no depende del grado de ocupación de los centros vecinos.
- Sobre cada centro pueden adsorberse varias capas de moléculas, siendo el calor de adsorción para todas ellas equivalentes excepto para la primera.

El objetivo de este modelo es calcular la relación entre el número de moléculas adsorbidas “n” y el número total de centros de adsorción “ n_0 ”. Esto debido a la consideración de posiciones ocupadas por más de una molécula, suposición contraria al modelo de Langmuir. Para estimar el grado de recubrimiento se establece una condición de equilibrio para cada una de las capas formadas, definiendo el número de posiciones de adsorción con j moléculas adsorbidas (s_j).

Los valores de s_j pueden relacionarse entre sí estableciendo la condición de equilibrio entre posiciones de adsorción con un número diferente de moléculas adsorbidas. Para el caso

$$\alpha = a_0 \left(\frac{\Delta H a}{RT} \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

de posiciones vacantes “ s_0 ” y posiciones con una única molécula “ s_1 ” hace referencia al caso particular del cual Langmuir habla.

$$\frac{s_1}{s_0} = \frac{N\theta}{N(1-\theta)} = KP \quad \text{Ecuación 16}$$

N: Parámetro característico relacionado con la afinidad entre el adsorbato y el adsorbente.

BET extiende esta relación postulando entre posiciones $j-1$ y j moléculas adsorbidas, siendo la constante de equilibrio K^* para todo valor de $j > 1$: para $j= 2, 3, \dots$

$$\frac{s_j}{s_{j-1}} = K^* P \quad \text{Ecuación 17}$$

La isoterma de sorción de BET normalmente se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{V}{V_{mon}} = \frac{CX}{(1-X)(1-X+CX)} \quad \text{Ecuación 18}$$

V_{mon} : Volumen de gas necesario para completar la primera monocapa.

$C=K/K^*$ (valor que dependerá únicamente de la temperatura).

$X= K^*P$.

2.1.1.4 Modelo de Dubinin Astakhov (DA)

A partir de la Teoría de Polanyi, Dubinin-Astakhov formuló la primera teoría de llenado del volumen de microporo (TVFM), la cual es comúnmente usada para describir el equilibrio de materiales microporosos, especialmente el de carbones activos y zeolitas. Esta teoría se basa en el postulado de la temperatura invariante “ $A = f(N_{ads})$ ”; es decir, la representación gráfica del volumen adsorbido frente al potencial de adsorción, esto es, la curva característica de adsorción de un adsorbente determinado. Su aplicación es principalmente en procesos adsorptivos de vapores a presiones relativamente bajas, donde es despreciable la influencia del área superficial de los macroporos y mesoporos. Esta teoría está representada matemáticamente por la *Ecuación 19*.

$$N_{ads} = N_{ads,max} \exp\left[-\left(\frac{A}{E}\right)^n\right] \quad \text{Ecuación 19}$$

E : Energía característica de adsorción.

2.1.1.5 Modelo de Dubinin Radushkevich (DR)

Este modelo es una simplificación del modelo DA, donde el parámetro asociado a la afinidad adsorbato/adsorbente es igual a dos. Su campo de aplicación son los materiales microporosos con estructura homogénea y/o energéticamente homogéneo. Para carbones activados homogéneos n es igual a dos, por lo que corresponde a la ecuación original por Dubinin-Radushkevich.

$$N_{ads} = N_{ads,max} \exp\left[-\left(\frac{A}{E}\right)^2\right] \leftrightarrow N_{ads} = \exp\left[-\frac{\left[RT\ln\left(\frac{P}{P_0}\right)\right]^2}{(\beta E_0)^2}\right] \quad \text{Ecuación 20}$$

E_0 : Energía característica de adsorción del adsorbato patrón.

β : Factor de escala.

Esta ecuación prevé una relación lineal entre $\ln(N_{ads}/N_{ads,max})$ y $\ln(P_s/P)^2$, que se cumple en el rango microporoso de muchos adsorbentes.

2.1.1.6 Modelo de Dubinin-Radushkevich Modificado (MDR)

MDR es una modificación al modelo DR con el fin de usarlo en adsorbentes con volúmenes grandes y con un número sustancial de cationes ubicados en sus cavidades (adsorbentes energéticamente heterogéneos). Este modelo está representado por:

$$N_{ads} = N_{ads,max1} e\left[-\left(\frac{A}{E_1}\right)^2\right] + N_{ads,max2} e\left[-\left(\frac{A}{E_2}\right)^2\right] \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde, el primer y segundo término del lado derecho representan la adsorción en los centros activos y la adsorción debida al resultado de las fuerzas de dispersión, respectivamente.

2.1.1.7 Modelo de Dent

Este modelo es similar al de BET, pero asume que las propiedades termodinámicas del agua secundaria son iguales a las del agua líquida. Este modelo está representado por:

$$N_{ads} = \frac{m_0 k_1 X}{(1-k_2 X)(1-k_2 X+k_1 X)} \quad \text{Ecuación 22}$$

k_1 y k_2 : Constantes relacionadas con las energías de adsorción de los sitios primarios y secundarios respectivamente.

m_0 : Es la capacidad de adsorción de la monocapa.

2.1.1.8 Modelo de Subinin-Serpinsky

Este modelo asume que la adsorción de las moléculas de agua se lleva a cabo en los centros primarios de adsorción. Las moléculas adsorbidas son también capaces de formar puentes de hidrógeno con otras moléculas de agua, por lo que actúan como centros secundarios de adsorción.

$$X = \frac{N_{ads}}{C(1-kN_{ads})(S_0+N_{ads})} \quad \text{Ecuación 23}$$

S_0 : Concentración adsorbida en los sitios primarios.

C : Describe la adsorción y desorción.

k : Representa la pérdida de sitios secundarios debido a la adsorción.

2.1.1.9 Modelo de GAB

El modelo de **G**uggenheim, **A**nderson y **B**oer (GAB) es utilizado principalmente para **describir la desorción de agua en alimentos** debido a sus bases teóricas. Este modelo es una modificación del modelo de BET y para tener en cuenta los efectos de la temperatura, se modifica con funciones tipo Arrhenius para las variables α y k , como se muestra a continuación:

$$N_{ads} = \frac{m_0 \alpha k X}{(1-kX)(1+(\alpha-1)kX)} \quad \text{Ecuación 24}$$

donde los parámetros α y k son modelados mediante una aproximación tipo Arrhenius, así:

$$k = k_0 e^{\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right)} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\alpha = \alpha_0 e^{\left(\frac{\Delta H_\alpha}{RT}\right)} \quad \text{Ecuación 26}$$

ΔH_k y ΔH_α son funciones del calor de sorción del agua en [J/mol], y se define como:

$$\Delta H_\alpha = H_m - H_n \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\Delta H_k = L_T - H_n \quad \text{Ecuación 28}$$

H_m y H_n representan los calores de sorción de la monocapa y multicapa respectivamente.

L_T : Es el calor latente de vaporización del agua pura en [J/mol].

R : Constante universal de los gases, 8.3145 [J/mol °C].

α_0 y k_0 son constantes adimensionales ajustadas por la temperatura.

T : temperatura de equilibrio en [°C].

2.1.1.10 Modelo de Dent modificado

Considera los efectos de la temperatura para determinar los parámetros que relacionan las energías de adsorción de los sitios primarios y secundarios, k_1 y k_2 . Para tomar en cuenta este efecto se vale de las expresiones tipo Arrhenius, *Ecuación 30*, muy similares a las empleadas en el modelo anterior.

$$k_1 = \alpha_0 e^{\left(\frac{\Delta H_a}{RT}\right)} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$k_2 = k_0 e^{\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right)} \quad \text{Ecuación 30}$$

ΔH_a y ΔH_k son calculados con las *Ecuaciones 27 y 28*.

2.1.2 Modelo cinético

2.1.2.1 Modelo unipore

El transporte de sólidos se puede clasificar en dos tipos de difusión: la difusión que sigue la Ley de Fick y que no depende primordialmente de la estructura del sólido y, por otro lado la difusión en sólidos porosos en donde la estructura real y los canales vacíos revisten gran importancia [15]. Como el deshidratado de alimentos está íntimamente ligado con el fenómeno de difusión por migración de la humedad del interior hacia el exterior, es posible analizarlo particularmente hablando con la segunda Ley de Fick, la cual es considerada como el primer método tradicional de estudio de la transferencia de masa en estado no estacionario para el deshidratado de productos hortofrutícolas [16]:

$$\frac{[X-X_e]}{[X_0-X_e]} = \frac{8}{\pi^2} \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2} \right) \quad \text{Ecuación 31, Ley de Fick [17]}$$

D_{eff} : Difusividad efectiva [$m^2 s^{-1}$]

L : Espesor de la rebanada [m]; es preciso considerar que el espesor de la rebanada permanecerá constante a lo largo del proceso de deshidratado.

t : Tiempo de deshidratado [s]

El coeficiente de difusión se obtiene de la pendiente de la gráfica de $\ln[(X-X_e)/(X_0-X_e)]$ respecto al tiempo t .

Empleando el modelo unipore propuesto por Correa [8] que propone estimar los parámetros de difusión, partiendo de los pequeños cambios en la presión total del sistema se considera que la concentración es constante en la superficie del alimento y por lo tanto la ecuación de difusión es la solución de la segunda Ley de Fick [8]

$$\frac{Mt}{M_{\infty}} = \frac{6}{\sqrt{\pi}} (De t)^{1/2} \quad \text{Ecuación 32}$$

De : Difusividad efectiva [s^{-1}].

t : Tiempo [s]

Mt : Captación de gas [g].

M_{∞} : Consumo total de gas [g]

Para la *Ecuación 32*, si se realiza una gráfica de $t^{1/2}$ vs Mt/M_{∞} será una línea recta cuya pendiente $6(De/\pi)^{1/2}$, por lo tanto se puede obtener el valor de difusividad efectiva De . La difusividad efectiva es relacionada con el coeficiente de difusión D .

$$De = \frac{D}{r_0^2} \quad \text{Ecuación 33}$$

Con D el coeficiente de difusión [m^2s^{-1}], y r_0 el cambio de difusión, si el radio medio de la partícula es sustituido por r_0 , el coeficiente de difusión se puede calcular.

2.1.2.2 Modelo de transferencia lineal LDF

El modelo de fuerza impulsora lineal de masa, es un modelo usado comúnmente para el análisis de cinéticas.

$$\frac{dN_{ads}}{dt} = K(N_{ads.equi} - N_{ads}) \quad \text{Ecuación 34}$$

N_{ads} : Cantidad adsorbida a cualquier tiempo t [g/g].

$N_{ads.equi}$: Cantidad adsorbida en equilibrio [g/g]

K : Constante cinética [s^{-1}]

Una gráfica de $\ln(1 - N_{ads}/N_{ads.equi})$ vs tiempo, dará líneas rectas confirmando el modelo en sí y la pendiente entregará el parámetro cinético.

2.1.3 Modelo de Predicción

El nuevo modelo para la predicción de las isoterms de sorción de las curvas del tipo II y III está basado en la Teoría del Potencial de Polanyi [18]. Este modelo permite predecir las isoterms de sorción a diferentes temperaturas a partir de un sólo dato experimental, reducir tiempo de experimentación y costos de operación.

2.1.3.1 Teoría de Potencial de Adsorción de Polanyi

En 1914 la teoría del potencial de adsorción fue propuesta por Eucken y Polanyi para la descripción del fenómeno de adsorción, por tal motivo esta teoría es comúnmente llamada

Teoría de Polanyi. Dicha teoría considera que el proceso de adsorción se da en multicapas, a esto le llamo potencial de adsorción el cual fue establecido como independiente de la temperatura, en otras palabras, los enlaces de Van del Waals son independientes de la temperatura; sin embargo, para moléculas polares como el agua esto no es del todo cierto.

$$\left(\frac{\delta A}{\delta T}\right)_{Nads} = 0 \quad \text{Ecuación 35}$$

Pero a pesar de esto, la Teoría de Polanyi no reporta una ecuación para representar las isothermas de sorción, por lo que queda incompleta para efecto de describir este tipo de gráficos.

En el trabajo de Correa [8], se propone lo siguiente:

Dado el potencial de adsorción dado por

$$A = RT \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad \text{Ecuación 36}$$

Con la curva característica construida es posible determinar las isothermas de sorción a otras temperaturas. Este modelo se puede obtener tomando la *Ecuación 35*, integrando bajo una condición isobárica y reemplazar la *Ecuación 36*. De esta forma, es posible construir las isothermas de sorción usando tan sólo un conjunto de datos experimentales, como consecuencia:

$$\ln(P_i) = \ln(P_{si}) - \left(\frac{T_1}{T_i}\right) \ln\left(\frac{P_{s1}}{P_1}\right) \quad \text{Ecuación 37}$$

La *Ecuación 37* es un método efectivo y novedoso para la construcción de isótermas de adsorción-desorción y está basado en la Teoría de Polanyi, con la cual se pueden predecir correctamente las isothermas de sorción de agua con errores inferiores al 5% [8].

En general el estudio de los procesos de adsorción enfocado a los alimentos es de vital importancia al aportar información indispensable. Hasta hace unos años, el modelo con mayor aplicación en alimentos era la ecuación isoterma de BET pero sólo es aplicable en el intervalo de $0.05 < A_w < 0.35-0.4$ [13, 7], siendo que el intervalo de mayor interés en el área de los alimentos abarca desde A_w 0.1 hasta 0.9, ello representaba una limitación importante en la aplicación de dicha isoterma. Particularmente la isoterma de GAB es la correlación recomendada por la European COST (European Cooperation in Science and Technology) [19], ya que proporciona información valiosa sobre la vida de anaquel y del diseño del equipo deshidratador, así como datos valiosos para comprender la cinética del proceso. Sin embargo, el Modelo de Polanyi tiene una buena aproximación de predicción y rapidez de cálculo, al depender de información fácil de obtener, comparado con los modelos anteriores [3].

2.1.4 Calor isostérico

El calor isostérico es la energía disipada durante la adsorción o la energía requerida para la desorción [8]. Técnicamente es una magnitud termodinámica que describe cuantitativamente la interacción entre el adsorbato y el adsorbente; su valor no puede determinarse de una manera directa, debe obtenerse a través de otros calores de adsorción como son los calores

isostéricos de adsorción, isotérmicos y adiabáticos, obtenidos experimentalmente ya sea que el proceso de adsorción transcurra a volumen constante, temperatura constante o que se realice sin intercambio de calor con el medio exterior, respectivamente [20]. La ecuación que define el calor isostérico de adsorción se puede derivar de la ecuación del tipo *Clausius-Clapeyron*⁴ [20, 21, 17, 14, 22, 23, 24, 25] al proceso de adsorción. En el trabajo de Rouquerol y François 1999 [10], se explica que puede llegarse a esta ecuación partiendo del equilibrio establecido entre la fase de condensación y la fase gaseosa en términos de la energía libre de Gibbs, de donde se deriva la siguiente expresión:

$$Q_{isos} = \left(\frac{v_n}{v_g} - 1 \right) RZ \left(\frac{\partial \text{Ln}(P)}{\partial (1/T)} \right)_{N_{ads}} = H_g - H_n \quad \text{Ecuación 38}$$

R: Constante de la ecuación de estado del gas evaluado

Z: Factor de compresibilidad; *Z*=1 para un gas ideal, *Z*≠1 para un gas real

v_n y *v_g*: Volumen parcial de las especies adsorbidas y de la fase gaseosa, respectivamente

Si se desprecia el volumen molar de la fase condensada respecto a la fase gaseosa y adicional se considera comportamiento de gas ideal para esta misma, se obtiene la ecuación de Clapeyron. Adicionalmente, por la Teoría de Polanyi, se considera la cantidad de agua adsorbida en cualquier tiempo “*N_{ads}*” constante, haciendo de las derivadas parciales derivadas totales.

$$-R \frac{d \text{Ln}(A_w)}{d(1/T)} = RT^2 \frac{d \text{Ln}(A_w)}{dT} = Q_{isos} \quad \text{Ecuación 39}$$

El calor isostérico estimado por medio de la ecuación de Clapeyron se relaciona con el Ln(*A_w*) vs 1/*T*. Puede determinarse dicho calor con la pendiente que se genera de la relación anteriormente mencionada.

$$\frac{d \text{Ln}(A_w)}{d(1/T)} = -\frac{Q_{st}}{R} = m \left[\frac{kJ}{mol} \right] \quad \text{Ecuación 40}$$

m: Pendiente de la recta Ln(*A_w*) vs 1/*T*

⁴ La ecuación de *Clausius-Clapeyron* es fundamental en el estudio de las transiciones de fase de primer orden, en el diagrama PT está representada como la pendiente que describe la coexistencia de dos fases en equilibrio. En el trabajo de *S. Velasco & C. Fernández* [71] se presentan **once posibles formas de obtener su representación matemática**, algunos de ellos con diferentes variantes e indicando su grado de dificultad, así como los diferentes niveles de aplicación en las diversas áreas de la Termodinámica.

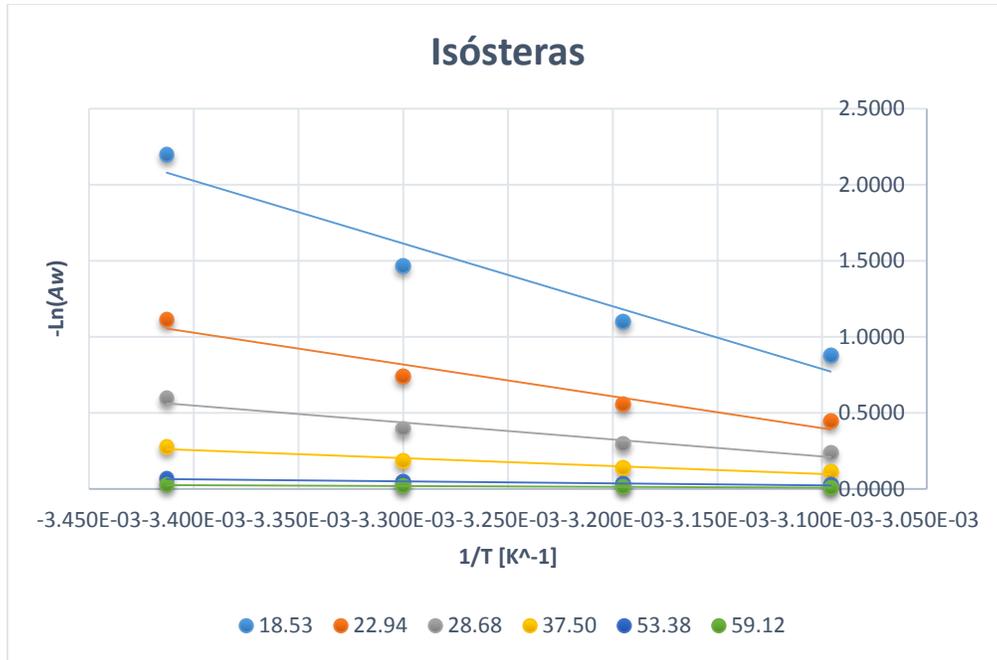


Figura 2.3 Isóstera de sorción para piña, generada por el autor con los datos de Hossain et al. [25]

El valor del Q_{isos} puede calcularse de la pendiente de la recta que representa el logaritmo neperiano de la presión parcial, para un valor constante de la cantidad adsorbida, frente a la temperatura [20]; al multiplicarla por la constante del gas evaluado “ R ” se obtiene el valor del Q_{isos} , de donde se genera un tercer gráfico. El área bajo la curva representa la energía necesaria para secar un alimento partiendo de una humedad inicial (producto fresco), a una humedad final (producto deshidratado). La limitante del método es que sólo funciona en procesos de fisisorción [21], excluyendo los relacionados con la quimisorción; sin embargo, anteriormente se explicó que precisamente el fenómeno que compete al deshidratado de alimentos es la fisisorción.

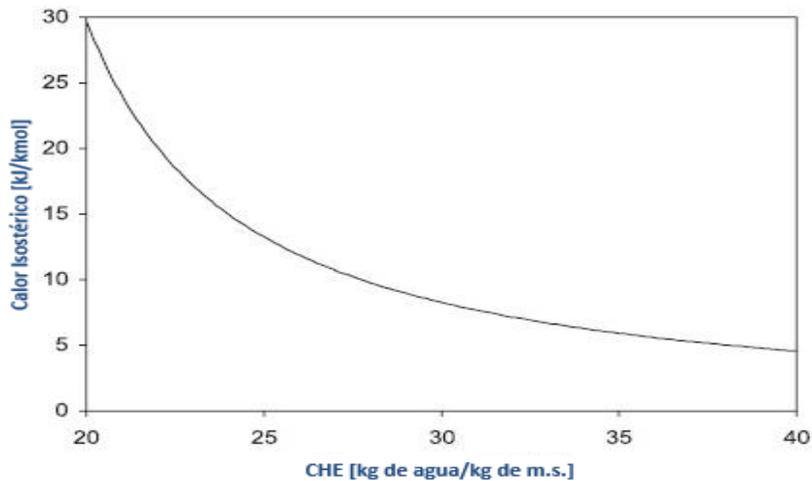


Figura 2.4 Curva representativa del calor isostérico de la piña [25]

2.1.5 Metodología para la construcción de isothermas por el Método de Polanyi y determinación del calor isostérico por el Método de Clausius-Clapeyron

El objetivo es determinar el calor isostérico de los alimentos que se vayan a deshidratar para cuantificar la cantidad de energía térmica requerida al momento de diseñar un deshidratador de alimentos.

El calor isostérico se puede calcular mediante el empleo de dos métodos diferentes:

- Ecuación de Clausius-Clapeyron
- Método de Caurie

En la sección anterior se habló de cómo obtener la ecuación de Clausius-Clapeyron, que es la que se empleará en este trabajo; la razón fundamental es por su rapidez de cómputo y la buena aproximación que se obtiene respecto a los valores determinados con análisis termogravimétricos y calorimetría de exploración diferencial [26, 27]. Se ha estimado, que el valor del calor isostérico puede obtenerse con una precisión comprendida entre el 1% y el 3% [20].

$$Q_{st} = -R \frac{d\ln(A_w)}{d(1/T)} \quad \text{Ecuación 41 [17]}$$

Donde A_w es la actividad de agua y Q_{st} el calor isostérico neto de sorción o desorción en [kJ/mol], R la constante universal de los gases ideales y T es la temperatura absoluta [K]. Es necesario aclarar que dependiendo de la dirección en la que migre el agua, es que se diferencia un fenómeno adsorptivo (hidratación o rehidratación) de uno desorptivo (deshidratación). Hay autores que por practicidad al momento de estudiar estos fenómenos y bajo ciertas circunstancias consideran que ambos fenómenos son iguales, pero se ha comprobado que no lo son, ya que hay alimentos que presentan histéresis al momento de efectuar una adsorción y posteriormente una desorción. Para efectos de este trabajo todo el estudio está enfocado a fenómenos desorptivos, fenómenos de deshidratación de alimentos, pero los métodos y teorías explicadas a continuación son válidas tanto para fenómenos adsorptivos como desorptivos.

El calor isostérico neto desorptivo puede calcularse mediante la representación lineal de $\ln(A_w)$ (calculados a humedad constante) frente a $1/T$. En concordancia con la *Ecuación 41*. Para dicha representación se requiere contar con las isothermas de sorción a diferentes temperaturas.

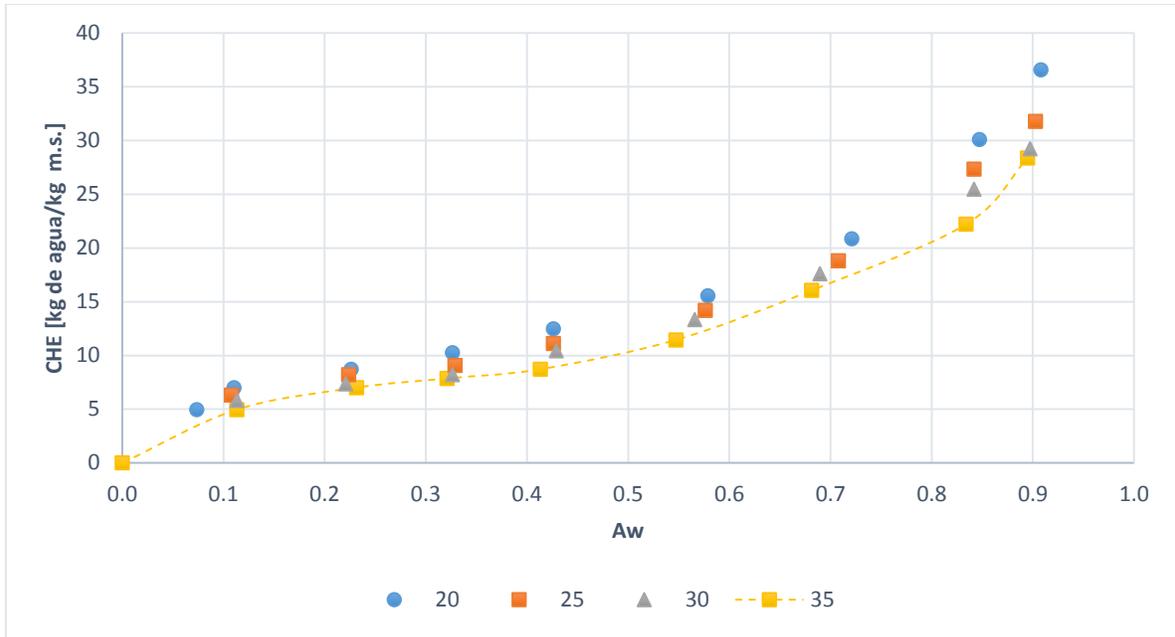


Figura 2.5 Isotermas experimentales de sorción de harina de yuca a diferentes temperaturas [14]

Cómo puede apreciarse, la Figura 2.5 relaciona la A_w del alimento respecto al contenido de humedad que va ganando (hidratación o rehidratación). Para poder generar la representación lineal $\ln(A_w)$ frente a $1/T$, se tabula la información de las isotermas.

Data			Current status		
N.△	X	Y	N.△	X	Y
16	0.0736842	4.95726	25	0.0815789	4.95726
17	0.110526	7.00855	26	0.107895	6.32479
18	0.226316	8.71795	27	0.223684	8.20513
19	0.326316	10.0855	28	0.326316	9.05983
20	0.426316	12.4786	29	0.426316	11.1111
21	0.576316	15.5556	30	0.576316	14.188
22	0.721053	20.6838	31	0.707895	18.8034
23	0.847368	29.9145	32	0.842105	27.3504
24	0.907895	36.5812	33	0.902632	31.7949

Data			Current status		
N.△	X	Y	N.△	X	Y
34	0.0894737	4.95726	43	0.113158	4.95726
35	0.113158	5.81197	44	0.231579	7.00855
36	0.221053	7.35043	45	0.321053	7.86325
37	0.326316	8.20513	46	0.413158	8.71795
38	0.428947	10.4274	47	0.547368	11.453
39	0.565789	13.1624	48	0.681579	16.0684
40	0.689474	17.6068	49	0.831579	22.2222
41	0.842105	25.4701	50	0.894737	28.3761
42	0.897368	29.0598			

Figura 2.6 La columna que pertenece a las abscisas representa la A_w , mientras que la columna de las ordenadas es el contenido de humedad. Los datos se generaron con el programa GetData Graph Digitizer, versión 2.26.0.20

En caso de no contar con la información de las otras tres temperaturas, 25, 30 y 35 [°C], se ha comprobado que existe un modelo que permite construir las isósteras basado en la Teoría de Polanyi [8]; dicho modelo reduce considerablemente el tiempo experimental con respecto a otras técnicas experimentales y herramientas computacionales, para aplicar este modelo basta con tener los primeros datos isotérmicos a cierta temperatura. Si partimos de la primera tabla a 20 [°C] para el ejemplo de harina de yuca, para generar las otras tres tablas restantes se aplica el modelo “*Potencial de Adsorción de Polanyi*”, explicado en la sección 2.2.1.3.

Recordando la definición de A_w , es una medida de la cantidad de moléculas de agua en el espacio alrededor del alimento cuando éste es confinado en un recinto herméticamente cerrado. Esta medida se expresa en relación a una referencia que es el agua pura; es entonces una medida de la humedad relativa (HRE) que existe, al estado de equilibrio dentro del recinto cerrado o donde se ha depositado el alimento estudiado. Matemáticamente hablando dicha variable se expresa como la relación entre la presión parcial de vapor de agua del alimento (P) y la presión parcial de vapor de agua pura (P_0) a la misma temperatura.

Otra manera de expresar la *Ecuación 37* es:

$$A = RT_i \ln\left(\frac{P_i}{P_{0i}}\right) = RT_1 \ln\left(\frac{P_1}{P_{01}}\right) \quad \text{Ecuación 42}$$

P_i : presión de vapor del agua del alimento a la temperatura i .

P_1 : presión de vapor del agua del alimento a la temperatura 1 .

P_{0i} : presión de vapor de agua pura a la temperatura i .

P_{01} : presión de vapor de agua pura a la temperatura 1 .

$$A_w = \frac{P_s}{P} = \frac{HRE}{100} \quad \text{Ecuación 43 [28]}$$

Por lo que la *Ecuación 42* puede reescribirse como:

$$A = RT_i \ln(A_{wi}) = RT_1 \ln(A_{w1}) \quad \text{Ecuación 44}$$

Despejando A_{wi} se tiene:

$$e^{\ln(A_{wi})} = e^{\frac{T_1}{T_i} \ln(A_{w1})}$$

$$A_{wi} = e^{\frac{T_1}{T_i} \ln(A_{w1})} \quad \text{Ecuación 45}$$

Para el ejemplo de la harina de Yuca A_{wi} es la actividad de agua a la temperatura que deseamos construir la isoterma, T_i , T_1 es a la temperatura de 20 [°C] y A_{w1} es la actividad de agua a 20 [°C]. Se calcula A_{wi} para 25, 30 y 35 [°C].

Tabla 2.1 Datos de isotermas para harina de yuca a diferentes temperaturas, calculados a partir de los valores de la CHE a 20 [°C]

<i>A_w</i>	CHE a 20	<i>A_w</i>	CHE a 25	<i>A_w</i>	CHE a 30	<i>A_w</i>	CHE a 35
0.0737	5	0.1170	5	0.1673	5	0.2160	5
0.1105	7	0.1717	7	0.2303	7	0.2841	7
0.2263	9	0.3046	9	0.3714	9	0.4278	9
0.3263	10	0.4082	10	0.4740	10	0.5273	10
0.4263	12	0.5081	12	0.5688	12	0.6165	12
0.5789	16	0.6435	16	0.6925	16	0.7299	16
0.7211	21	0.7698	21	0.8041	21	0.8295	21
0.8474	30	0.8759	30	0.8955	30	0.9097	30
0.9079	37	0.9256	37	0.9376	37	0.9463	37

Reorganizamos la información en función de la cantidad de humedad

Tabla 2.2 Datos numéricos para generar las isotermas de sorción

CHE	<i>A_w</i>			
	20	25	30	35
5	0.0737	0.1241	0.1758	0.2253
7	0.1105	0.1717	0.2303	0.2841
9	0.2263	0.3046	0.3714	0.4278
10	0.3263	0.4082	0.4740	0.5273
12	0.4263	0.5056	0.5664	0.6144
16	0.5789	0.6458	0.6946	0.7318
21	0.7211	0.7698	0.8041	0.8295
30	0.8474	0.8759	0.8955	0.9097

Una vez con esta información se tienen todos los elementos para calcular el calor isostérico a través de la ecuación de Clausius-Clapeyron, para ello es imprescindible calcular:

Tabla 2.3 Datos numéricos para generar las isósteras de sorción

Sólo para CHE 5 [kg de agua/ ks m.s.]		
T [°C]	-Ln(<i>A_w</i>)	(-)/T
20	2.6080	0.0034
25	2.0864	0.0034
30	1.7386	0.0033
35	1.4903	0.0032

Y se hace esto para todas las cantidades de humedad desde 4.95 hasta 36.5 [kg de agua/kg de m.s.], para poder graficar $\ln(A_w)$ vs $1/T$ y llegar a la siguiente representación gráfica.

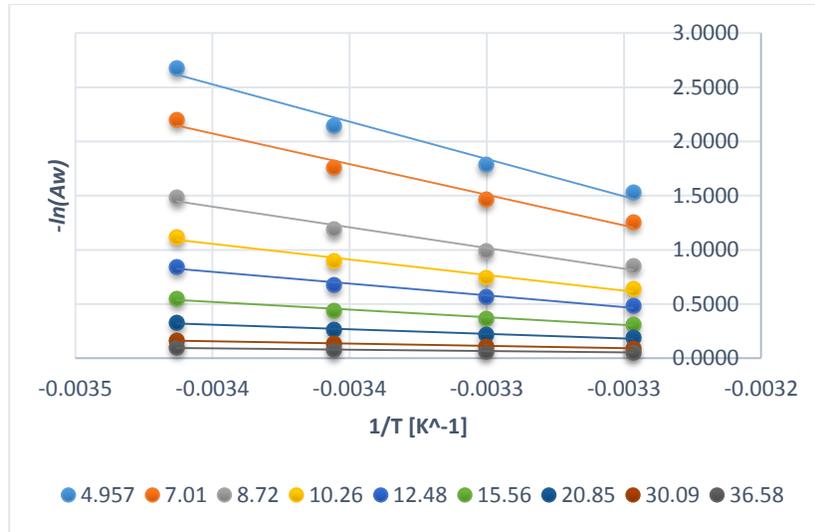


Figura 2.7 $-\ln(A_w)$ vs. $1/T$ para el cálculo del calor isostérico en harina de yuca para diferentes valores de la CHE. A este gráfico se le conoce como isósteras desortivas [14]

La pendiente de cada una de estas curvas es equivalente a:

$$m = \frac{d\ln A_w}{d(1/T)}$$

$$Q_{st} = -Rm$$

Ecuación 46

Al multiplicar cada una de las pendientes por la constante universal de los gases ideales se obtiene cada uno de los puntos, que al ser graficados forman la curva del calor isostérico.

El área bajo la curva es la cantidad de energía requerida para deshidratar un alimento partiendo de una cantidad de humedad inicial hacia una determinada al final del proceso de deshidratación.

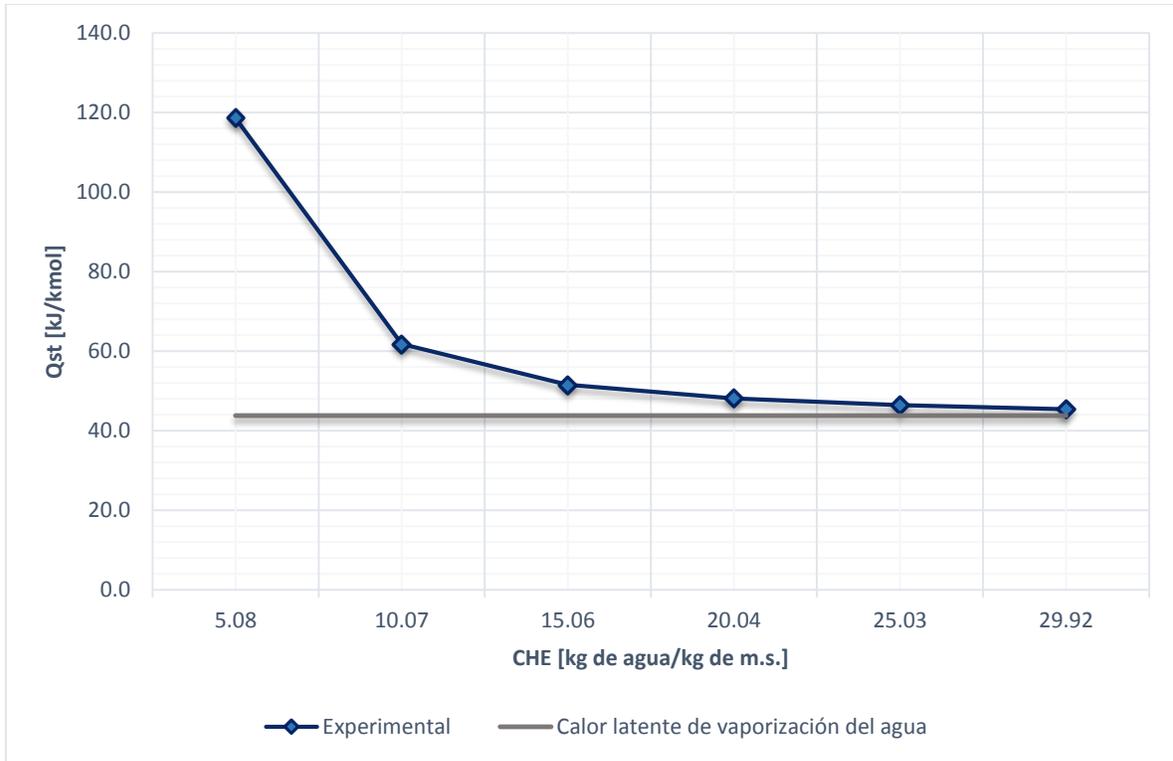


Figura 2.8 Variación del calor isostérico de sorción frente al Contenido de Humedad en Equilibrio de yuca [14]

3 EFECTO DEL DESHIDRATADO EN LOS ALIMENTOS DE ORIGEN ORTOFRUTÍCOLA

3.1 Química del jitomate (*Lycopersicum esculentum*) y otros alimentos deshidratados

3.1.1 El calor como método físico para el control microbiano

Desde hace mucho tiempo, los seres humanos han empleado métodos físicos para el control microbiano, con el objeto de conservar los alimentos por más tiempo a través del deshidratado y salado de los mismos. Actualmente hay diversos métodos para el control microbiano, pero el más común aplicado en la industria alimenticia e incluso en el instrumental quirúrgico, es el calor. Las altas temperaturas desnaturalizan las enzimas de los microorganismos, resultando en un cambio estructural tridimensional de estas proteínas, produciendo su inactivación.

La resistencia al calor varía entre los diferentes microbios y de esta diferencia se desprenden los siguientes conceptos:

- **PMT:** Es la temperatura más baja necesaria para causar la muerte de todas las bacterias en una suspensión líquida particular en diez minutos.
- **TMT:** Es el menor tiempo necesario para que todas las bacterias de un cultivo líquido mueran a una temperatura determinada.
- **TRD:** También denominado valor D; es el tiempo en minutos que tardan en morir el 90% de la población bacteriana a una temperatura determinada.

Las bacterias se agrupan en tres categorías, basándose en la temperatura adecuada para su crecimiento:

Psicrófilos: Son bacterias que crecen mejor en temperaturas bajas, entre 0 [°C] - 20 [°C] (32 [°F] – 68[°F]).

Mesófilos: El rango de temperatura ideal para este grupo de bacterias oscila entre los 25 [°C] – 45 [°C] (77 [°F] – 113 [°F]).

Termófilos: Las bacterias termófilas crecen mejor en temperaturas calientes entre los 50 [°C] – 70 [°C] (122 [°F] – 158 [°F]).

Hipertermófilos: En ocasiones termófilos extremos, viven en fuentes termales asociadas con la actividad metabólica. Se han registrado crecimiento de estas bacterias en temperaturas de hasta 121 [°C] y viven en fuentes termales asociadas con la actividad

volcánica, como las ventilas hidrotermales; el azufre es importante para sus funciones metabólicas [29].

Acotando aún más el grupo de bacilos que se evita proliferen en los productos deshidratados, se acortará el grupo de estudio, enfocándose sólo en aquéllos que tienen como móvil el alimento y proliferen dentro del rango de temperaturas bajo las cuales el proceso puede llevarse. Por esta razón, se hizo un compendio de las bacterias que causan las infecciones gastrointestinales, en función de las que J.Vila [30] ha considerado como agentes patógenos de dicha afección, *Tabla 3.1*.

Tabla 3.1 Compendio de Bacilos patógenos en las enfermedades gastrointestinales

Bacterias	Temperatura de incubación [°C]
<i>E. coli</i> [31]	35
<i>Shigella</i> [32]	37
<i>Salmonella</i> [33]	37
<i>Campylobacter</i> [34]	42
<i>Yersinia</i> [35]	< 29
<i>Bacillus cerus</i> [34]	37
<i>Staphylococcus aureus</i> [34]	37
<i>Clostridium perfringens</i> [34]	37
<i>Vibrio</i> ⁵ : <i>Aeromonas plesiomonas shigelloides</i> [34]	30-44

Por lo anterior, la deshidratación de alimentos debe realizarse a temperaturas superiores a 45 [°C]; para garantizar que el equipo funcione como un verdadero deshidratador de alimentos y no como una máquina incubadora de agentes patógenos a la salud del consumidor.

Por lo general, la industria alimentaría recurre a procesos de conservación con calor a altas temperaturas, ya que lo primero que se quiere garantizar es la inocuidad del alimento. Una vez finalizado el proceso se vitaminan los alimentos, agregando nutrientes que se perdieron durante el proceso térmico, al ser termosensibles e hidrosolubles. Un ejemplo de esto, es la cocción con vapor, donde las paredes de los hornos pueden alcanzar hasta 300 [°C].

Los alimentos que se deshidratan deben estar monitoreados, una de las variables importantes es precisamente la temperatura; esta variable indicará si la temperatura es la adecuada para inactivar los procesos metabólicos de algunas cepas de bacilos que hayan logrado sobrevivir al proceso de lavado del alimento y, también indicará si la temperatura de deshidratación es la adecuada para el alimento, pero conservando nutrientes vitales para el cuerpo humano. Debido a la gran diversidad de alimentos y sus propiedades fisicoquímicas, las temperaturas máximas permisibles entre un alimento y otro variarán. Por consiguiente, en apego de la literatura consultada, se siguieron los siguientes estándares de calentamiento para los alimentos desglosados en la *Tabla 3.2*

⁵ Se refiere al grupo de las *Vibrionaceas*, su temperatura optima de crecimiento es entre 30[°C] a 37 [°C]; la *Plesiomonas Shigelloides* bacilo perteneciente a este grupo, puede soportar temperaturas de hasta 44 [°C] [34].

Tabla 3.2 Contenido de humedad de algunos productos y temperaturas máximas permisibles⁶

PRODUCTOS		HUMEDAD INICIAL %	HUMEDAD SECO %	TEMPERATURA MÁXIMA [°C]
Granos	Arroz	22-24	11 a 14	50
	Maíz	35	14	60
	Trigo	20	13	50
	Cacahuete	40	9	--
	Café	50	11	--
Tubérculos	Papa	75	11	55
Hortalizas	Chícharo	80	5	60
	Coliflor	80	6	50
	Zanahorias	70	5	60
	Cebollas	80	4	55
	Ajos	80	8 a 10	50
	Verduras con hojas	80	10	50
	Chile	86	5	60
	Jitomate	95	8	65
Fruta	Durazno	85	18	--
	Manzana	84	14	50
	Plátano	78	15	55
	Guayaba	80	7	--
	Uva	80	15 a 20	55
	Mango	85	12 a 15	65
	Papaya	85	2 a 15	65
Pescado	Sin salar	80	15	40
	Salado	80	35 a 45	40

3.1.2 Desnaturalización de la vitamina C

Investigaciones recientes han demostrado lo sensible que es el ácido ascórbico, vitamina C, a procesos térmicos [36]. El contenido de vitamina C en rebanadas de jitomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) se ve reducido en un 65.8% tratado a 60 [°C], mientras que a 120 [°C] se pierde un 46.5%, de donde se concluye que, un rápido proceso de deshidratación retendrá más cantidad de vitamina C en comparación con un deshidratado lento [37].

Sin embargo, se ha determinado que al variar el espesor de las rebanadas de jitomate, los daños sobre la desnaturalización de dicha vitamina no son tan alarmantes en comparación a los típicos procesos de deshidratación; en la *Figura 3.1* se muestra el comportamiento de diferentes rebanadas de jitomate, temperatura y porcentaje de pérdida del ácido ascórbico, de donde se aprecia que si se elige una temperatura de 60 [°C] y una rebanada de 11 [mm], la reducción en vitamina C es poco menos del 40% con un tiempo de deshidratación de 14

⁶ Esta tabla es un compendio de dos fuentes bibliográficas, donde sólo se consideraron los productos más populares en nuestro país; [68] & [34]

[hrs.], mientras que para una temperatura de 120 [°C] el porcentaje perdido es del 20% y 4 [hrs.] de deshidratación.

Los alimentos que están sujetos a este problema, por su contenido vitamínico, se ilustran en la *Tabla 3.3*.

Tabla 3.3 Contenido de vitamina C de diversas frutas y verduras frescas [11]

Frutas y verduras	mg/100g
Durazno	4
Manzana	10
Plátano	10
Mandarina	25
Piña	25
Jitomate	25
Papa	30
Toronja	40
Naranja	50
Limón	50
Col	60
Chiles	120
Guayaba	300
Brócoli	300

Hasta el momento, con la información presentada puede pensarse que la solución está dicha, reducir el tiempo de deshidratación con una temperatura de 120 [°C] y cortes en las rebanadas de 11 [mm]; sin embargo, este tipo de procesos es muy complicado por la gran cantidad de reacciones químicas que intervienen y que a simple vista puede parecer sencillo, como el deshidratado de alimentos. A continuación se explica cuáles son estas reacciones químicas, las cuales modifican el metabolismo del alimento a través de la alteración de su bioquímica.

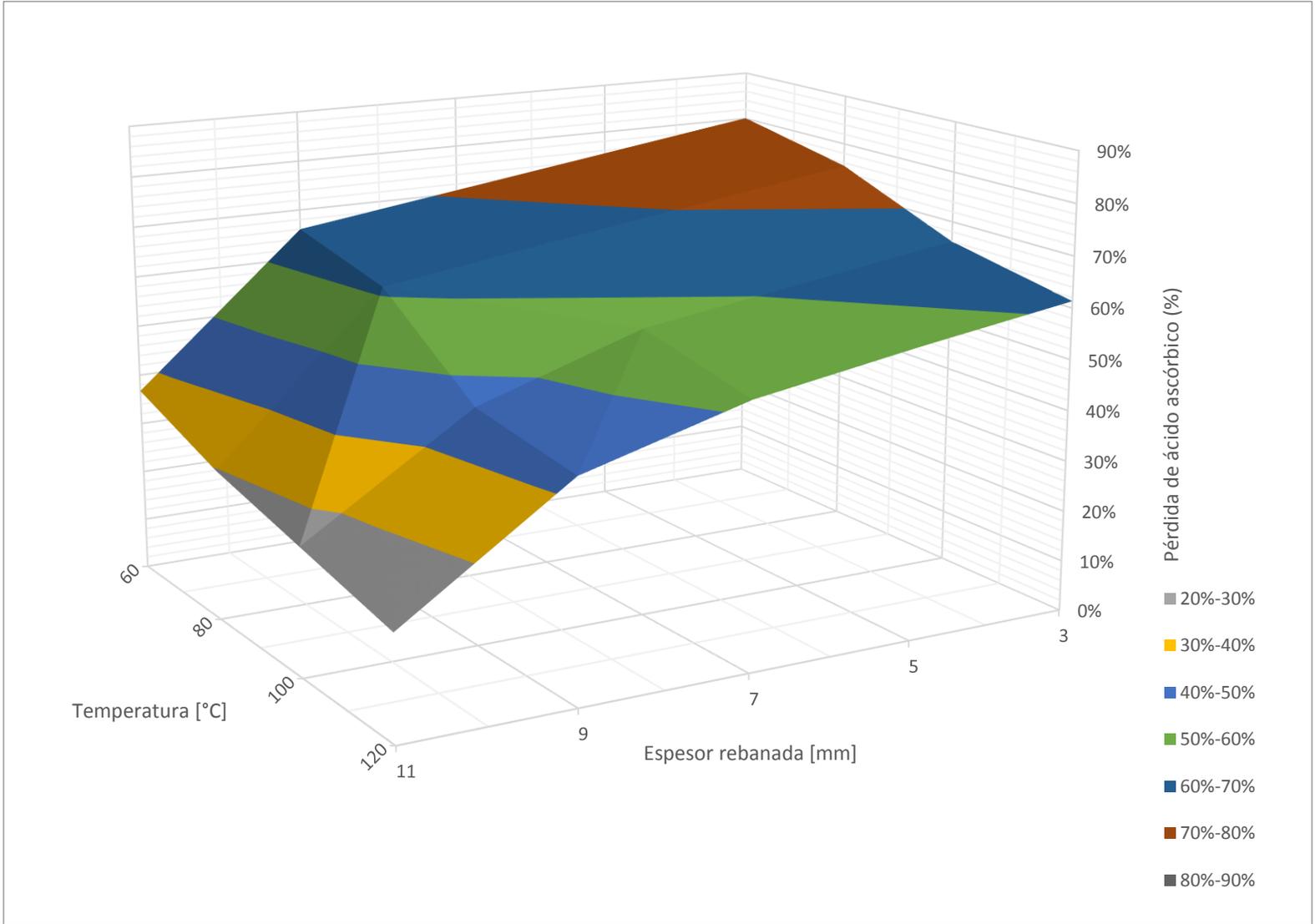


Figura 3.1 Porcentaje de la pérdida de ácido ascórbico en función de la temperatura de deshidratación y el espesor de las rebanadas de jitomate [37]

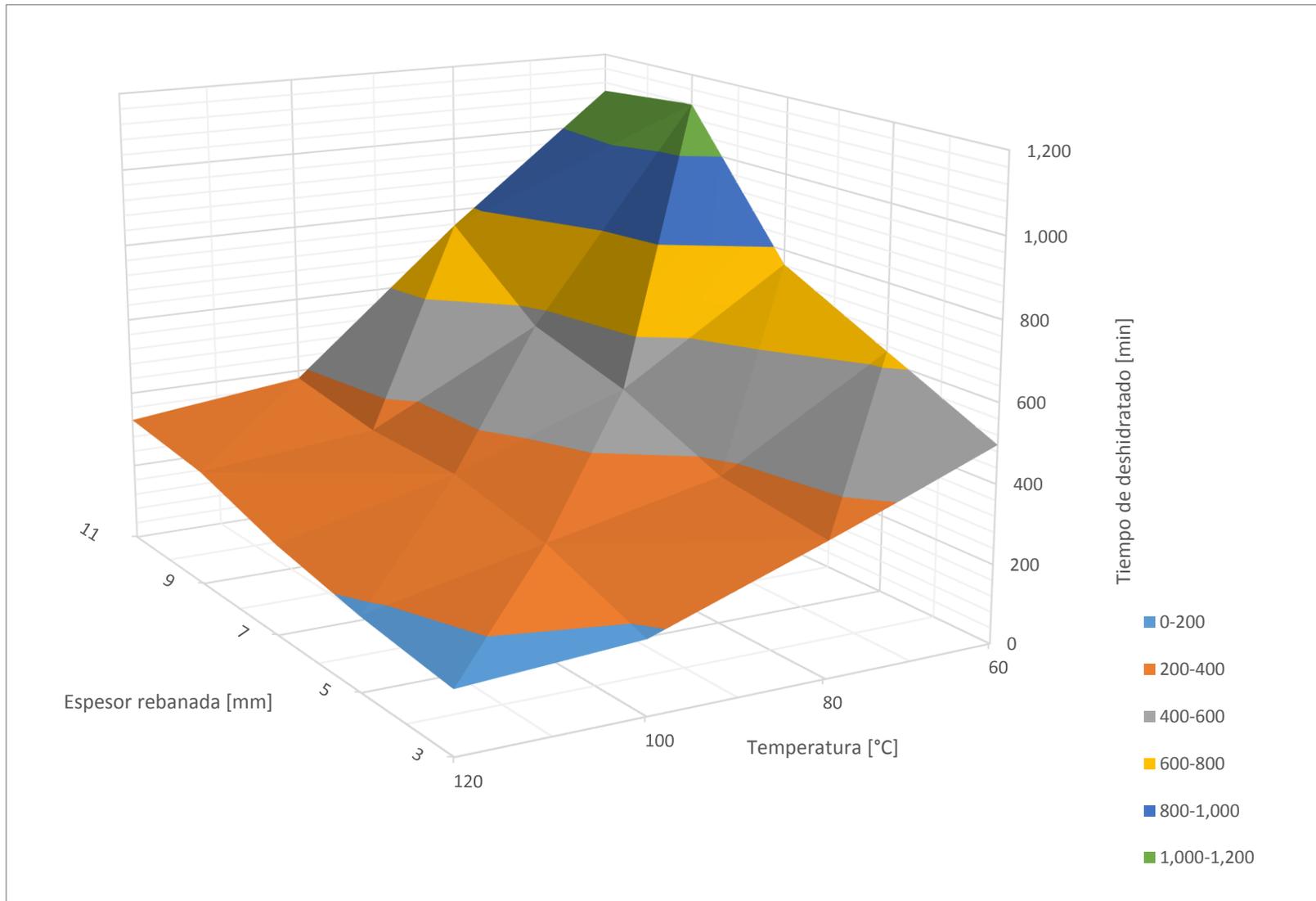


Figura 3.2 Tiempo de deshidratación en función de la temperatura y espesor de la rebanada de jitomate [37]

En las rebanadas delgadas de jitomate de 3 [mm] la rapidez de secado es mayor, comparada con las rebanadas más gruesas de 11[mm]; esto se debe al fenómeno de difusión del agua libre por migración a través de las estructuras capilares del tejido. Al haber vías capilares más cortas en las rebanadas delgadas, se optimiza el proceso de deshidratado, reflejándose en un menor tiempo de duración del proceso. Entre más delgadas son las rebanadas, el tejido celular queda más expuesto, por esta razón es más susceptible la pérdida de vitamina C. Para los 3 [mm] de espesor la pérdida de dicha vitamina es del 50% en adelante, mientras que para los 11[mm] de espesor la pérdida es del 20% al 40%, dependiendo de la temperatura de trabajo.

Partiendo que el ácido ascórbico es termosensible, se podría aseverar que a 120 [°C] la pérdida del compuesto será mayor respecto a 60 [°C]; sin embargo, no es así. Entre ambas situaciones, para 3 [mm] de espesor la diferencia porcentual de la degradación del compuesto es de 20 unidades (va de 60% a 80% de pérdida de vitamina C), siendo mayor la pérdida a 60 [°C]. Esto se debe al tiempo de exposición, ya que en la *Figura 3.2*, se observa que el diferencial de tiempo de deshidratado entre 60 [°C] y 120 [°C], para la situación anteriormente mencionada de 3 [mm], es de 7 [hrs.] aproximadamente. Analizando el caso para 11[mm] de espesor y el mismo rango de temperaturas el diferencial porcentual de la pérdida vitamínica es de 15 unidades (va de 20% a 35% de vitamina C), con un diferencial de tiempo de 13 [hrs.]. Hasta el momento puede afirmarse que el espesor de las rebanadas, es inversamente proporcional al grado de oxidación del ácido ascórbico. Entre mayor sea el grosor de la rebanada, mayor es la protección que brinda al tejido interno y consecuentemente a los compuestos bioactivos de agentes oxidantes como la luz, temperatura y humedad.

Análogamente a la teoría del radio crítico, en transferencia de calor, se puede plantear la pérdida de ácido ascórbico para el espesor de las rebanadas, debido a que disminuye o favorece la pérdida vitamínica. Hipotéticamente hablando existe un espesor crítico, que aumente o minimice la pérdida de ácido ascórbico. Como tal no se ha reportado en la literatura pruebas de que esto sucede, pero existe parte de verdad sobre este fenómeno y pudiera sustentarse con las pruebas experimentales que Zaroni B. et al. [38] hizo, quien determinó la pérdida de ácido ascórbico en mitades de jitomates deshidratados a 80 [°C] con espesor por mitad de 32.5 [mm], concluyendo que al final del proceso de deshidratado la oxidación del compuesto activo se cuantificaba en un 92.4%. A modo de tener una visualización de la hipótesis planteada anteriormente, se compararon los resultados de la pérdida de ácido ascórbico para 3, 5, 7, 9 y 11 [mm] a 60 [°C] [37], con los resultados de Zaroni B. et al. [38] plasmándolos en el gráfico de la *Figura 3.3*. Debido a que los métodos discrepan en las temperaturas a las que se ejecutaron el deshidratado da pie a pensar que la desnaturalización del ácido ascórbico pudo haber sido por las temperaturas altas. Sin embargo, la pérdida de ácido ascórbico con el método de Zaroni B. et al. [38], tuvo que haber sido menos alarmante que la de 60 [°C], debido a que su tiempo de exposición al calor tan solo fue de 7 [hrs.] comparado con las 18 [hrs.] que Khazaei et al. [37] reporta en su trabajo. Por lo que puede concluirse, parcialmente, que las rebanadas con grosores excesivos propiciarán que la degradación de ácido ascórbico sea similar al de las rebanadas delgadas.

Calificar el grosor de una rebanada como excesivo, será aplicable a aquella que tenga un espesor superior al espesor crítico, el cual se identificará por ser el punto de inflexión en la curva como aparentemente lo es el punto con 11 [mm] en la siguiente figura.

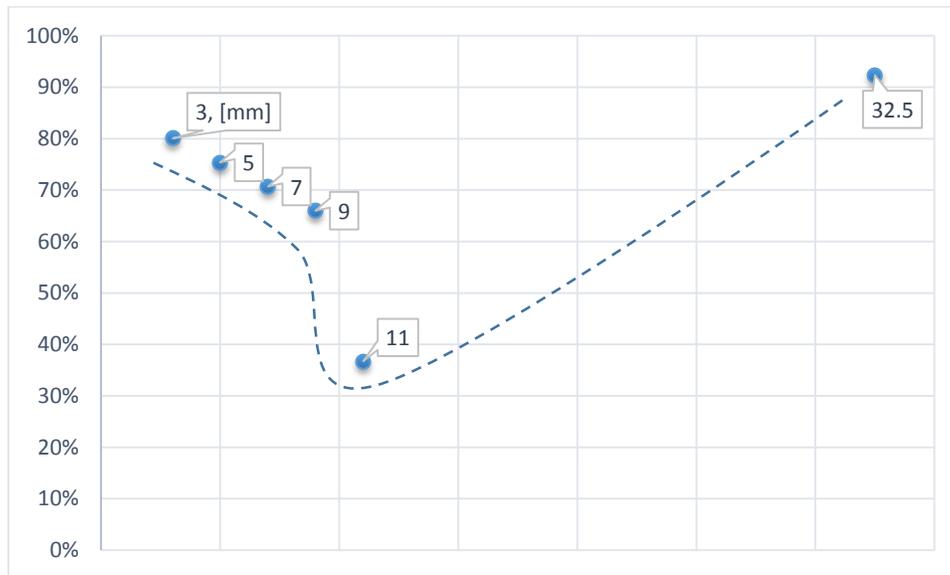


Figura 3.3 Pérdida porcentual de ácido ascórbico en jitomate en función del espesor de la rebanada, de 3[mm] a 32.5 [mm]; La línea punteada representa el posible comportamiento de la pérdida de ácido ascórbico en función del grosor de la rebanada

Si Λ es la pérdida de ácido ascórbico y ϵ el espesor de la rebanada, cuando la tasa de variación de la pérdida de ácido ascórbico respecto al incremento del espesor sea igual a cero, significa que la pendiente es cero y ese es el valor que representa el punto de inflexión, ver Ecuación 47, es decir, el valor del espesor crítico⁷.

$$\frac{d\Lambda}{d\epsilon} = 0 \quad \text{Ecuación 47}$$

3.1.3 Licopeno y la vida de anaquel después de un proceso de deshidratado

Los estudios en ingeniería de alimentos tienen como principal objetivo prevenir la degradación del licopeno durante la producción y *almacenamiento* de los alimentos; se le ha atribuido a la desnaturalización del licopeno factores como la exposición al oxígeno circundante en el medio ambiente, altas temperaturas y bajos contenidos de humedad [38]. Los carotenoides⁸, son el grupo de pigmentos bioactivos más distintivos del jitomate, destacando el licopeno entre este grupo de pigmentos.

⁷ En transferencia de calor se determina que el r crítico (r_c) al cual \dot{Q} alcanza un máximo, se determina a partir del requisito de que $d\dot{Q}/dr_c = 0$ (pendiente cero).

⁸ El licopeno, un carotenoide que se encuentra en el jitomate, previene la oxidación del colesterol de baja densidad, reduce el riesgo de desarrollar arterosclerosis y enfermedades coronarias; según los estudios

Para determinar la cantidad de licopeno residual en el jitomate se corrieron pruebas experimentales a 80 [°C] y 110 [°C], de donde se concluye que el licopeno, a diferencia de la vitamina C, resulta ser estable a lo largo de todo el proceso para ambas temperaturas, ver figuras 3.4 y 3.5.

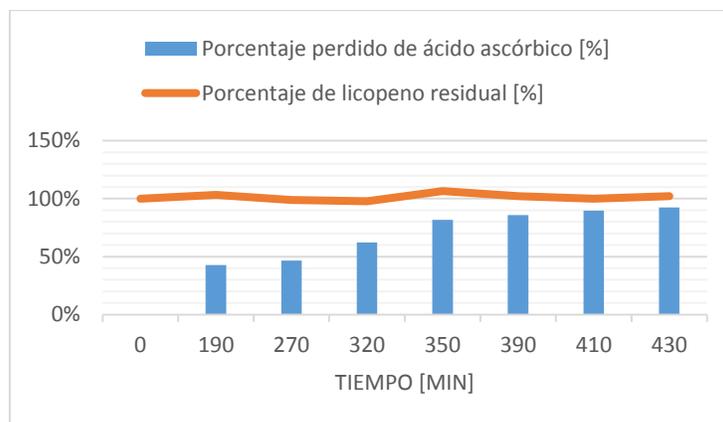


Figura 3.4 Porcentaje de vitamina C y licopeno perdido a 80 [°C] [38]

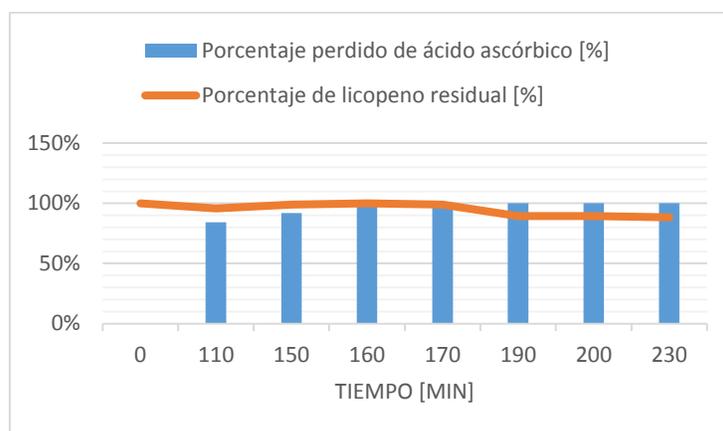


Figura 3.5 Porcentaje de vitamina C y licopeno perdido a 110 [°C] [38]

Estos resultados fueron obtenidos por Zanoni B. et al. [38], y quien a diferencia de J. Khazaei et al. [37], encontró que a 110 [°C] la pérdida de vitamina C fue en un 100%⁹; lo que deja en claro, que el licopeno no se ve afectado por las temperaturas e incluso se detecta más del 100% de la sustancia activa en el jitomate, este fenómeno se debe al efecto de concentración por deshidratación, así como por la síntesis de *novo* y transformación de carotenoides que se presenta en tejidos deshidratados [36].

realizados en los lípidos del cuerpo humano, demostraron que el consumo de al menos 40 [mg de licopeno/día] son suficientes [11].

⁹ Cabe mencionar que esta discrepancia en resultados se debe a que Zanoni B. et al. [19] proceso pulpa de jitomate comercial y la sometió a un centrifugado a 11,000 [g], donde g se refiere a la fuerza g, a 10 [°C] por un tiempo de 30 [min.].

Aparentemente, la temperatura para el caso del licopeno no es una preocupación, ya que incluso se ve favorecida la concentración del mismo en el total de sólidos obtenidos; sin embargo, se ha mencionado que sí ocurre una degradación de este antioxidante durante el proceso de *almacenamiento*; con el jitomate deshidratado a 80 [°C] y 110 [°C] se determinó que la vida de anaquel del jitomate expuesto a una menor temperatura presenta un contenido mayor de licopeno residual, que aquél que se deshidrató a una mayor temperatura.

Tabla 3.4 Contenido de licopeno, para jitomate deshidratado, después de haber sido almacenado a 37 [°C] [38]

Tiempo [día]	Deshidratado a 80 [°C]	Deshidratado a 110 [°C]
	Porcentaje de licopeno residual %	
0	100%	100%
30	46%	38%
40	44%	35%
50	39%	31%
60	34%	27%
90	26%	19%

3.1.4 El *Hidroximetilfurfural* (HMF) y la *Reacción de Maillard*

Para entender los resultados de la *Tabla 3.4*, es necesario hablar de la *Reacción de Maillard*. Debido al deshidratado, el color rojo característico del jitomate se torna a una coloración que oscila entre los tonos rojo ladrillo y marrón; este fenómeno se le conoce como oscurecimiento no enzimático o *Reacción de Maillard*, la cual es favorecida por la producción de HMF¹⁰. Deshidratar jitomate a 110 [°C], causa altas cantidades de *Hidroximetilfurfural* más que en el procesado a 80 [°C] [38], *Figura 3.6*.

La reacción de Maillard designa un grupo muy complejo de transformaciones, que traen consigo la producción de múltiples compuestos de bajo peso molecular, dichos compuestos repercuten directamente en el sabor, aroma, y el valor nutritivo de los productos involucrados; muchas veces estas propiedades sensoriales, olor, color y sabor, son propiedades que caracterizan a los alimentos, como la costra de los alimentos horneados, los postres a base de leche, el olor y sabor del café, pero en otros casos, la misma coloración resulta indeseable, como la que se puede presentar en las leches evaporadas y azucaradas, jugos concentrados, y muy particularmente, en el color marrón de las papas fritas. La generación excesiva de este tipo de reacciones da sabores amargos y colores muy intensos hacen del producto uno poco atractivo para el consumidor [11].

¹⁰ Hidroximetilfurfural, HMF o 5-(hidroximetil) furfural, la deshidratación genera furfural y sus derivados insaturados, que se polimerizan consigo mismos o con otras sustancias semejantes para formar las macromoléculas de pigmentos llamadas melanoidinas. Esta reacción de oscurecimiento, también llamada pirólisis, ocurre cuando los azúcares se calientan por arriba de su punto de fusión [11].

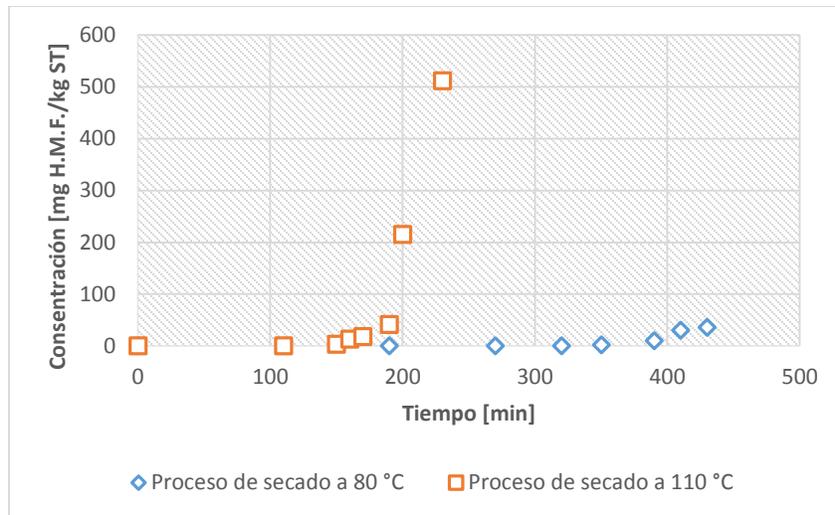


Figura 3.6 Producción de HMF en el deshidratado de jitomate a 80 [°C] y 110 [°C] [38]

Otro de los compuestos producidos por este oscurecimiento no enzimático da lugar a la formación de compuestos mutagénicos o potencialmente carcinogénicos como la acrilamida [11]. Trabajos como el de Cristina Delgado del CSIC (*Consejo Superior de Investigaciones Científicas*), aseguran que tanto la acrilamida como el HMF al ser ingeridos se metabolizan en otro tipo de sustancias, que pueden llegar a ser carcinogénicas [39].

El HMF, favorece a la Reacción de Maillard por su relación en la producción de radicales libres; por otra parte, en sistemas modelo que simulan alimentos deshidratados, la pérdida del β -caroteno por oxidación sigue un mecanismo de reacción en cadena con una cinética típica de las transformaciones autocatalíticas por medio de radicales, acelerando la oxidación por radicales libres, los cuales son generados por temperaturas altas, metales disueltos, exposición a la luz y enzimas [11]. La *Tabla 3.4*, muestra claramente la velocidad de degradación por oxidación del licopeno, otras investigaciones estiman que el contenido de este carotenoide en jitomate deshidratado, típicamente oscila entre el 8.1% y el 20.9% [36], dependiendo de la temperatura de deshidratado, humedad, exposición al oxígeno y a la luz, por lo que, se sugiere que los jitomates deben deshidratarse a temperaturas inferiores a los 70 [°C]; con el fin de obtener una mejor retención de carotenoides en el producto final [40, 36].

3.1.5 Velocidad del aire y su impacto en la calidad nutrimental en algunos alimentos

Otro de los factores importantes en la dinámica del deshidratado, que regirá la composición química, color y propiedades nutrimentales del alimento, es la velocidad del flujo del aire caliente sobre la superficie del alimento. Como referencia están los estudios experimentales de Arici et al. [41], quien trabajó con la flor de taro, específicamente el tubérculo, el cuál fue deshidratado a 40, 50, y 60 [°C] a velocidades de 0.50, 1.25 y 2.00 [m/s]. Los resultados reportan que las características generales del alimento se vieron comprometidas por las

condiciones de deshidratación a las que fueron sometidas; particularmente, se observó un aumento en el contenido de almidón resistente de 33.5 [g] a 51.4 [g], por cada 100 [g] de producto; determinándose así que las condiciones más favorables para el deshidratado son a 50 [°C] y 2.00 [m/s], para una mayor producción de almidón resistente en el producto. Ver *Tabla 3.5*.

El almidón resistente, es el almidón retrogradado a través de un proceso de gelatinización del almidón. Se le conoce como resistente debido a la incapacidad que tiene el intestino delgado de digerirlo, las bacterias que radican en el intestino grueso son quienes lo procesan. Cabe mencionar que estas bacterias al usarlo como alimento, procesan cadenas cortas de ácidos grasos que a su vez son benéficos para la salud; en general el almidón resistente impacta en la salud de una manera positiva, mejorando la digestión, la flora bacteriana benigna para el intestino, reduciendo el pH y la reducción de ácidos biliares, previniendo la degradación de la mucosa protectora de las células del colon, y reduciendo así el riesgo de desarrollar células cancerígenas [42].

Tabla 3.5 Contenido de almidón resistente y almidón a diferentes temperaturas y velocidades en el proceso de deshidratación [41]

T [°C]	Velocidad [m/s]	Almidón Resistente (AR), [g/100g]	Almidón [g/100g]	Total Almidón [g/100g]	Fibra [g/100g]
40	0.50	36.9	26.0	63.0	12.8
	1.25	33.5	26.7	60.2	
	2.00	48.0	11.3	59.3	
50	0.50	35.8	26.2	62.0	13.2
	1.25	43.8	17.2	61.0	
	2.00	51.4	13.2	64.7	
60	0.50	44.7	24.1	68.8	14
	1.25	41.0	19.1	60.1	
	2.00	41.4	17.0	58.5	

Paralelamente a esta mejora en el alimento, se encontraron variaciones significativas en el contenido de minerales, se creía que el perfil mineral del alimento no variaba pues a diferencia de las otras propiedades nutrimentales éstos son estables al calor. Los elementos analizados fueron Cu, Zn, Fe, K, Mn y Mg. Para el caso de Mg, las variaciones fueron de 129 a 163 [mg/100 g de producto], las más altas concentraciones de Fe y K, se produjeron bajo un deshidratado de 50 [°C] y una velocidad del aire de 1.25 [m/s]. Sin embargo, el contenido de Zn disminuye al aumentar la temperatura, contrariamente a lo que experimenta el Mn y Cu [41].

Tabla 3.6 Contenido de minerales después de un proceso de deshidratado a 1.25 m/s con diferentes temperaturas [41]

T [°C]	Cu [ppm]	Fe [ppm]	Zn [ppm]	Mn [ppm]	Mg [mg/100 g]	K [mg/100 g]
40	13.80	19.50	29.20	2.81	145.00	28.40
50	11.50	25.70	22.00	3.51	129.00	39.50
60	12.30	21.10	18.00	5.16	163.00	34.60

Basados en estos resultados, los alimentos que poseen almidón pueden sufrir un proceso de retrogradación en su contenido de almidón como son el plátano [43], plátano macho, mango, yuca [44], zanahoria, papa, arroz, tortillas y cereales [42].

Analizar los tejidos orgánicos de los alimentos, la porosidad, capacidad de rehidratación y el color, aportan información indirecta de la calidad del deshidratado ejecutado [45]. Sobre la coloración como anteriormente se explicó, las temperaturas altas desnaturalizan vitaminas, minerales y otros compuestos bioactivos, como pigmentos o compuestos volátiles; por lo tanto, el color de los productos deshidratados indica la retención de pigmentos y nutrientes, como los carotenoides, sabores, fenoles, clorofila, entre otros. Si el color final del producto es un indicio de la calidad, las mediciones de los parámetros de coloración, son usadas para optimizar el proceso de deshidratación.

Finalmente, la velocidad del aire, disminuye el tiempo de deshidratación, debido al mejoramiento que tiene la transferencia de calor por el incremento de los coeficientes de transferencia de calor, facilitando así, la remoción de agua por evaporación. Por otra parte, flujos veloces de aire reducen la formación de costras o caramelización del alimento que representa una resistencia natural al flujo de energía térmica [46, 47].

3.1.5.1 Cambios en el color.

Los indicadores de color L^* , a^* , b^* , son utilizados para describir los cambios en la coloración antes y durante el proceso de deshidratación [48, 40, 38, 46, 49]. La escala de color Hunter L , a , b , se desarrolló entre las décadas de los años cincuenta y sesenta. Dicha escala está organizada en un espacio tridimensional donde L^* es luminosidad ($L^*=0$ rendimientos negros y $L^*=100$ rendimientos blancos), a^* va de rojo a verde (a^* , valores negativos indican verde mientras valores positivos indican rojo), b^* es el gradiente del azul (b^* , valores negativos indican azul y valores positivos indican amarillo).

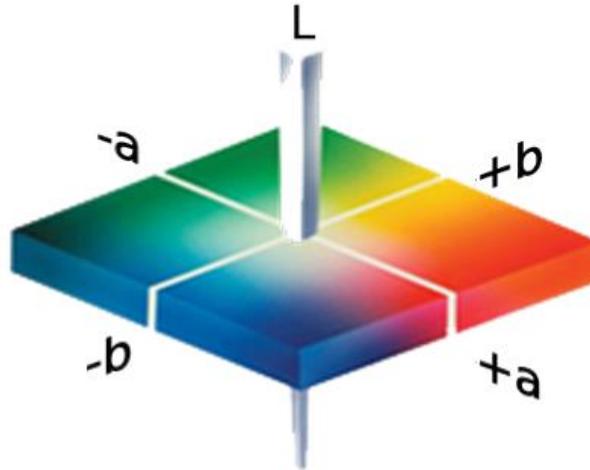
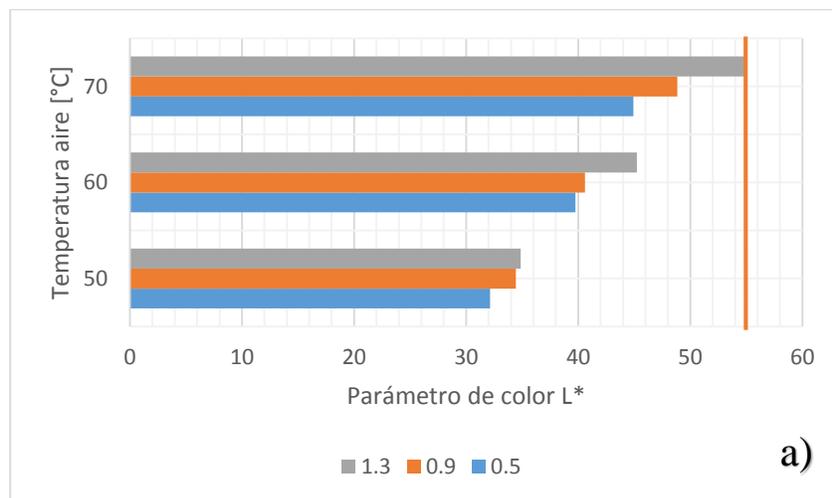


Figura 3.7 Escala de color Hunter

Cuando la temperatura y velocidad del aire disminuye, implica mayor tiempo de deshidratado, por lo que el valor de L^* y b^* disminuyen, mientras que el valor de a^* aumenta [46]. Lo anterior puede interpretarse de la siguiente manera; si L^* disminuye, indica una coloración oscura en el alimento deshidratado, valores bajos de b^* indican pérdida de color del alimento (caso del tejocote, en el que se observa una pérdida del color amarillento que lo caracteriza) [46], finalmente, algunos alimentos pueden tener valores negativos de a^* , y al término del deshidratado los valores serán positivos, esto es el reflejo de la pérdida de los colores verdosos-frescos por colores rojizos característicos de la deshidratación. De los trabajos de Serdar et al. [46], se demuestra que aparte de la temperatura, las velocidades en la deshidratación son importantes para mejorar la calidad del producto, ver *Tabla 3.7*.



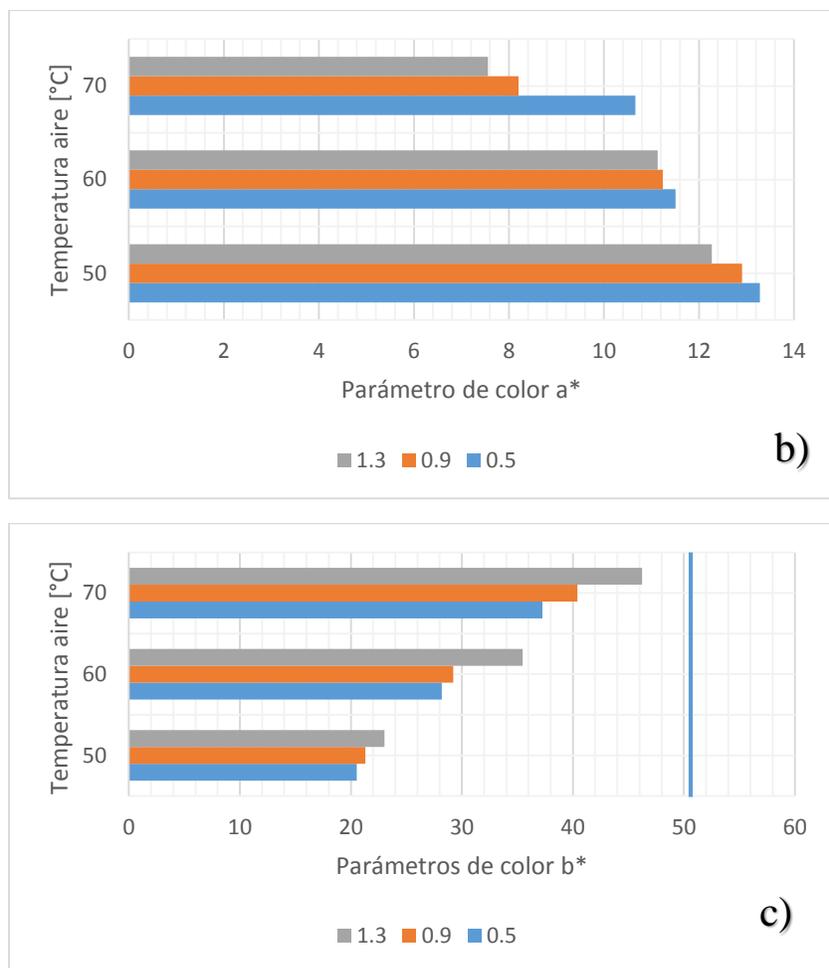


Figura 3.8 Parámetros de color, para diferentes muestras deshidratadas a diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire 1.3, 0.9 y 0.5 [m/s]; **a)** Mide el parámetro L^* , la línea roja, indica el valor máximo que tenía el producto fresco 55.51; **b)** Mide el parámetro de color a^* , entre menor sea el parámetro más cerca de las condiciones frescas estará; **c)** Mide el parámetro de color b^* , la línea azul indica el valor que tenía el producto fresco 50.49 [46]

Tabla 3.7 Evaluación de color en tejocote deshidratado [46]

T [°C]	Velocidad [m/s]	L^*	a^*	b^*
50	0.5	32.13	13.28	20.52
	0.9	34.45	12.91	21.30
	1.3	34.87	12.27	23.02
60	0.5	39.74	11.51	28.18
	0.9	40.60	11.24	29.23
	1.3	45.22	11.13	35.48
70	0.5	44.91	10.66	37.24
	0.9	48.84	8.20	40.40
	1.3	54.98	7.56	46.23
Producto Fresco		55.51	-1.012	50.49

Es evidente que las condiciones ideales para el deshidratado, que se determinan particularmente para esta experimentación es a 70 [°C], con una velocidad del aire de 1.3 [m/s].

3.1.5.2 Encogimiento y porosidad

El encogimiento, representa el volumen de reducción o el cambio de dimensiones, debido a la remoción del agua contenida en los alimentos. Se ha comprobado experimentalmente que a temperaturas bajas el encogimiento se incrementa y viceversa [46, 50, 48].

La mecánica estructural indica, que grandes potenciales de esfuerzos generados en la estructura celular del alimento es lo que determinará el grado de encogimiento y a su vez, éste determinará la capacidad de rehidratación del mismo. El potencial de esfuerzos depende de dos factores, el primero son las altas temperaturas, mientras que el segundo son los extensos tiempos de deshidratación bajo los que se somete el alimento. Abbasi S. et al. [50] experimentó con cebollas deshidratadas, a 60 [°C] y 70 [°C] con velocidad y tiempo constante, 1.5 [m/s] y 2 [hrs.]. Los cambios en la microestructura de la cebolla se observaron y registraron con la ayuda de un microscopio electrónico, ver *Figura 3.9*. En otro experimento se mantuvo a temperatura constante de 70 [°C] la misma velocidad que la prueba anterior, pero la nueva variable que incluyeron fue el tiempo, una muestra se expuso a la corriente de aire caliente por 6 [hrs.] mientras que la otra a 4 [hrs.] y los resultados obtenidos se aprecian en la *Figura 3.10*. Resultados similares fueron obtenidos por Serdal et al. [46]. Las *Figuras 3.9b*, *3.10a* y *3.11b* están relacionadas por la presencia de poros, en mayor cantidad que las otras imágenes con las que se comparan, como se comentó, para procesos largos de deshidratado la excesiva pérdida de agua y calor causan esfuerzos en las estructuras celulares que propician la formación de poros. De igual forma, las altas temperaturas causan evaporaciones violentas que incrementan la presión de vapor y erosionan el tejido. Finalmente, se determinó que una estructura porosa inhibe el encogimiento.

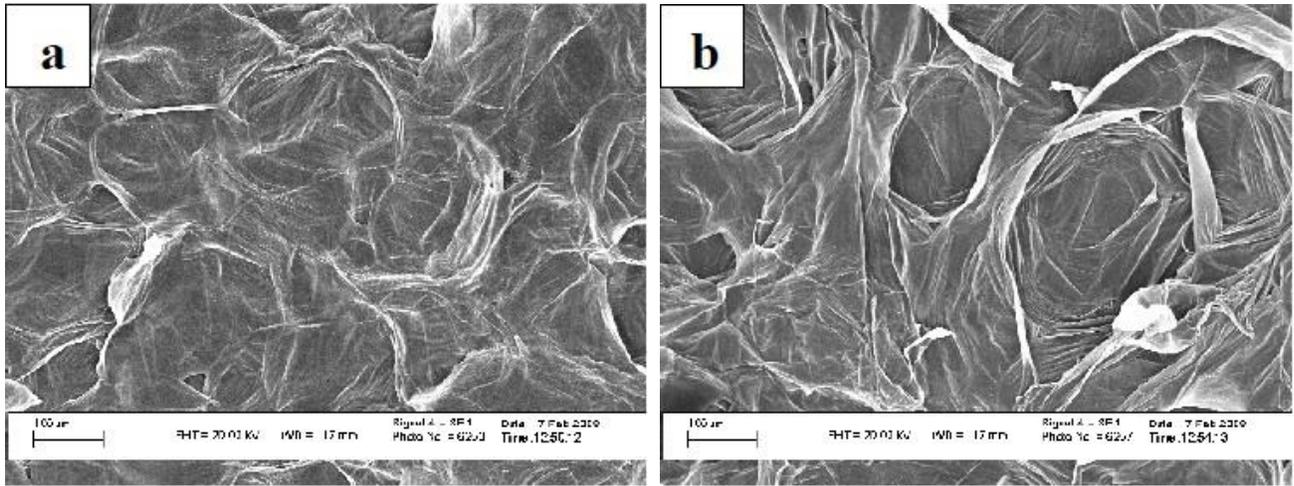


Figura 3.9 Imagen electrónica de rebanadas de cebolla después de 2 [hrs.] de deshidratado para diferentes temperaturas, a) 60 [°C]; b) 70 [°C] [50]

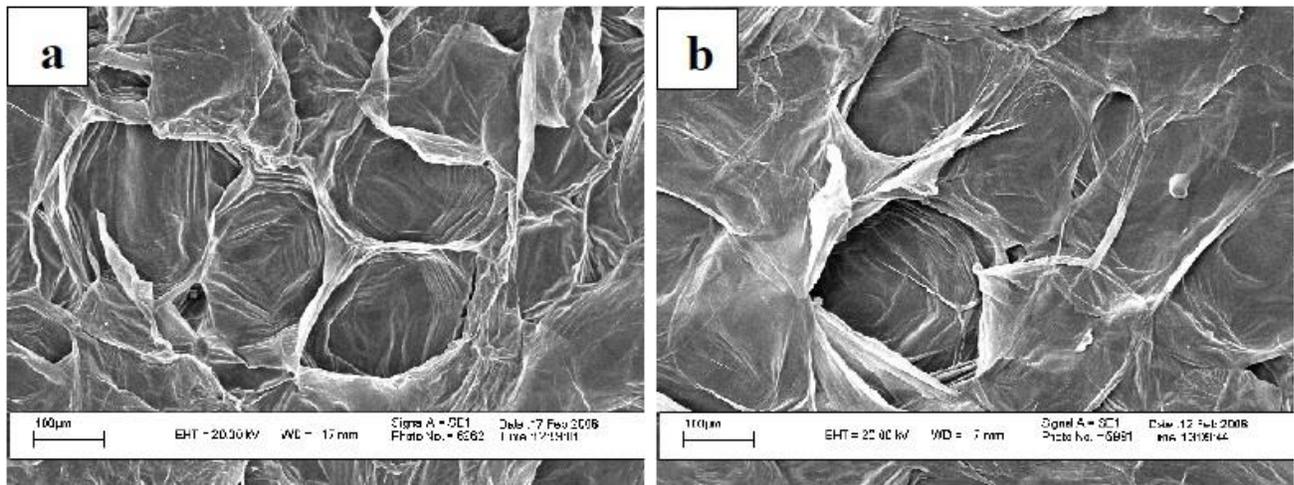


Figura 3.10 Imagen de rebanadas de cebolla deshidratadas a 70 [°C] para diferentes tiempos de deshidratado, a) 6 [hrs.]; b) 4 [hrs.] [50]

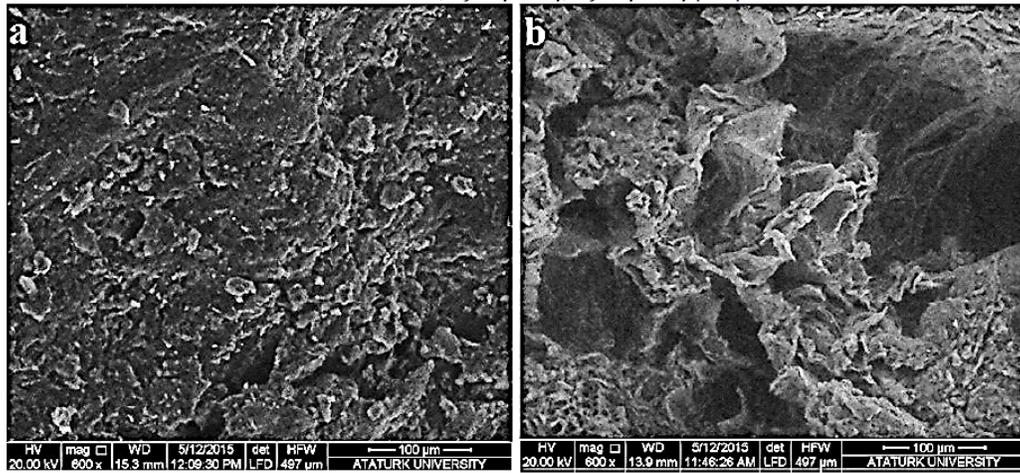


Figura 3.11 Imagen de tejocotes deshidratados a 1.3 [m/s], para diferentes temperaturas, a) 50 [°C]; b) 70 [°C] [46]

4 PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN DESHIDRATADOR DE ALIMENTOS, PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGÍA

4.1 Validación del Método de Polanyi

En el capítulo dos se mencionó que el método más práctico por el ahorro de tiempo y recursos en experimentación que representa, es el método basado en la Teoría del Potencial de Adsorción de Polanyi; en la sección 2.2.5, se detalló la metodología para la construcción de las isotermas desortivas, partiendo de un sólo dato experimental. Existen diversos métodos experimentales para determinar la CHE¹¹, pero los más habituales son higrómetros de punto de rocío, higrómetros eléctricos o recurrir a los métodos estáticos gravimétricos estandarizados [51, 17, 22, 24, 52, 23] y/o dinámicos [25]; dichos métodos son tardados y costosos, por esta razón se desarrollaron los métodos de correlación, ver sección 2.2.1.1, como el de GAB, Oswin, Chen, Chung-Pfost, Henderson, Halsey, BET, entre otros.

Las ventajas del Modelo de Polanyi sobre los métodos experimentales se deben a la rapidez con la que se pueden determinar las curvas isotérmicas a diferentes temperaturas. El método *estático gravimétrico* es usado para determinar la CHE; donde se colocan muestras de 3 [g] \pm 0.001 [g] por duplicado en cajas de petri, dichas cajas se colocan dentro de recipientes con soluciones de ácido sulfúrico utilizado para mantener la humedad relativa dentro de dicho recipiente. Los recipientes deben conservarse en gabinetes con temperaturas constantes dependiendo de la curva isotérmica que se busque construir. El control de temperatura se monitorea y controla dentro de un rango de ± 1 [°C]. Dependiendo el nivel de concentración que tenga la solución de ácido sulfúrico será la humedad relativa constante que mantendrá.

Tabla 4.1 Humedad Relativa para soluciones de ácido sulfúrico a la temperatura de trabajo [22]

Temperatura [°C]	% [w/w] Ácido Sulfúrico							
	20	30	40	50	55	60	65	70
40	88.1	75.8	57.7	37.3	27.4	18.0	11.0	4.8
50	88.2	76.2	58.5	38.3	28.4	19.0	11.8	5.4
60	88.3	76.6	59.3	39.4	29.6	20.0	12.7	6.2
70	88.4	77.0	60.1	40.5	30.6	20.9	13.5	6.8

Otra manera de lograr una humedad relativa constante, es a través de la saturación de diferentes sales dentro de un rango de 0.11 a 0.90. Se recomienda hacer tres corridas de cada una de las muestras. El tiempo que demora en llegar al equilibrio de humedad de las muestra

¹¹ Las unidades de medida es en % Humedad Base Seca (HBS) o [kg de agua/kg m.s.]; m.s.: masa seca.

va de tres semanas o más, dependiendo la humedad relativa y la temperatura de cada experimento.

Tabla 4.2 Valores de actividad de agua para diferentes soluciones salinas para tres diferentes temperaturas [24]

Sales	Temperatura [°C]		
	30	45	60
LiCl	0.113	0.112	0.110
CH₃COOK	0.216	0.195	0.160
MgCl₂	0.324	0.311	0.293
K₂CO₃	0.432	0.432	0.432
Mg(NO₃)₂	0.514	0.469	0.440
NaBr	0.560	0.520	0.497
SrCl₂	0.691	0.640	0.580
NaCl	0.751	0.745	0.745
KCl	0.836	0.817	0.803
BaCl₂	0.900	0.880	0.840

Correa [3], en su tesis doctoral desarrolla el método termodinámico que predice y explica el comportamiento de la sorción de agua en zeolita, y en Sales Higroscópicas Soportadas en materiales porosos (SHS/agua), basados en la teoría química y el potencial de Polanyi, respectivamente. Dicho trabajo versa sobre la adsorción de agua en materiales compuestos y en zeolita, con aplicación a la refrigeración por adsorción. Para corroborar la efectividad del Método de Polanyi aplicado a fenómenos de deshidratación de alimentos, se obtuvieron datos de curvas isotérmicas de los alimentos en cuestión.

4.1.1 Construcción de las Isósteras desortivas a partir de datos experimentales

4.1.1.1 Papa, primer caso

Se tomó como referencia los trabajos de Wang et al. [22] y Hossain et al. [25], para la papa y piña, respectivamente

Wang determinó la CHE para papas, para un rango de humedades de 03% a 87% de A_w a diferentes temperaturas (40, 50, 60 y 70 [°C]), usando el método *estático gravimétrico estándar*, el cuál fue desarrollado por la European Cooperation Project COST 90.

Datos experimentales del autor son presentados en la *Tabla 4.3*.

Tabla 4.3 Datos experimentales para papa analizado por Wang et al. [22].

Aw	40 [°C]	Aw	50 [°C]	Aw	60 [°C]
0.0296	2	0.0566	2	0.0599	2
0.0494	3	0.1195	3	0.1261	3
0.1783	4	0.1857	4	0.1956	4
0.2741	6	0.2850	5	0.2915	5
0.3733	8	0.3778	7	0.3975	7
0.5717	11	0.5633	10	0.5862	9
0.7532	16	0.7658	16	0.7688	14
0.8750	22	0.8857	21	0.8855	20

Con la información de A_w a 40 [°C] se hizo la predicción para 50, 60 y 70 [°C]. Las isothermas más importantes para la validación del método son 50 y 60 [°C].

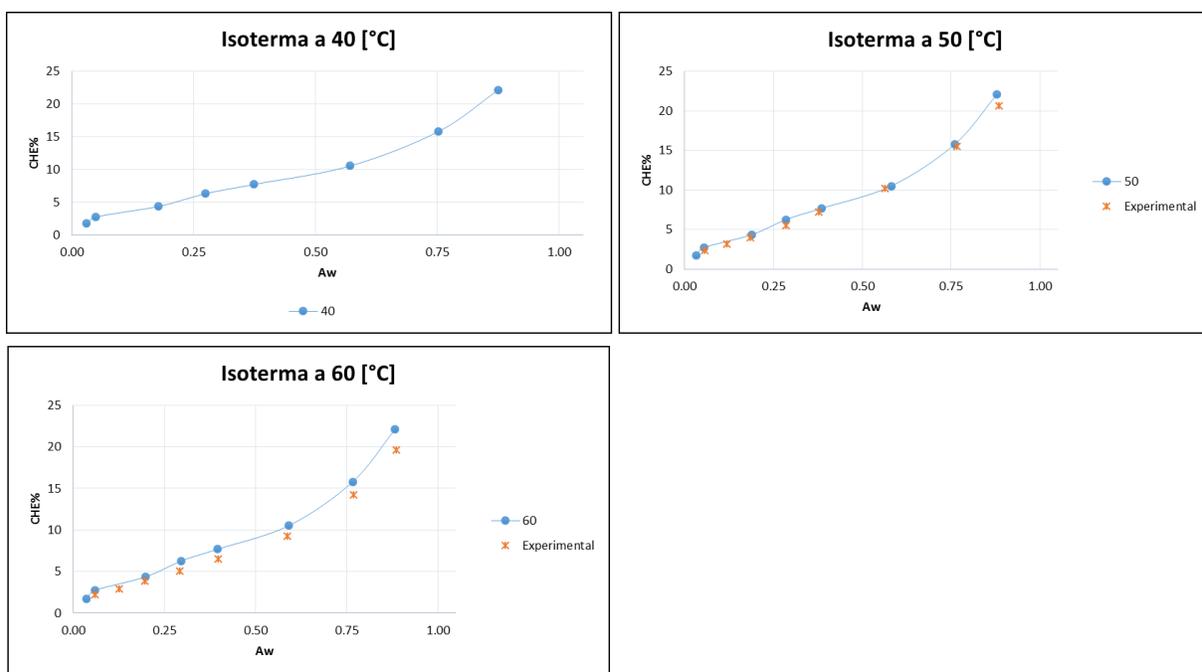


Figura 4.1 Isothermas de desorción calculadas con el Método de Polanyi y cotejadas con datos experimentales (papa Wang et al.)

La Figura 4.1 representa la relación en el equilibrio, entre la cantidad adsorbida y la presión a una temperatura constante. Su aplicación en la industria alimenticia va desde el diseño de varios procesos como el secado/deshidratado, mezclado y envasado de alimentos, así como determinar condiciones óptimas de almacenamiento, predicción de vida útil y selección del material de empaque adecuado. Reafirmando lo que se mencionó en la sección 2.2, las isothermas de sorción hacen referencia a procesos de adsorción o desorción. Los puntos con menor temperatura se sitúan, ligeramente, más arriba de los que tienen mayor temperatura, ocasionando que para una misma CHE la A_w , será mayor con el aumento de la temperatura.

Esto indica, que la papa es menos higroscópica a mayores temperaturas de almacenamiento. Resultados similares se han reportado en el estudio de isotermas de sorción en productos alimenticios [14].

Continuando con el análisis de los datos calculados y comparándolos con los reportados por el autor, para 50 [°C] y 60 [°C], se estimó el **Error Medio Relativo (EMR%)**; considerando que un modelo de sorción con un EMR% menor al 10% se considera aceptable [14].

$$(\%)EMR = \frac{100}{N} * \sum_{i=1}^N \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \quad \text{Ecuación 48}$$

X_{ei} : A_w experimental

X_{ci} : A_w calculada

Nm : número de muestras

El EMR% a 50 [°C] es de 11.08%, mientras que para 60 [°C] es de 18.31%. Los resultados experimentales y calculados se registraron en el mismo gráfico para las temperaturas en cuestión, 50 [°C] y 60 [°C], ver *Figura 4.1*. Pese a que el **EMR%** es mayor al 10% la aproximación se puede considerar aceptable en función de la facilidad de cálculo, al depender de información fácil de conseguir para su estimación. Sin embargo, para efectos de la determinación del calor isostérico, las isotermas no es el objetivo final, la información generada con el Método de Polanyi es utilizada para alimentar la ecuación de Clausius-Clapeyron, con la cual se determinará el calor isostérico. Claro que esto implicará arrastrar cierto error porcentual, pero al final los resultados del calor isostérico no distan de los reportados en la literatura.

Con los datos estimados, se calcula el logaritmo neperiano del A_w y $1/T$ [K⁻¹], para cada una de las temperaturas examinadas, de 40 [°C] a 70 [°C] y una CHE constante, por lo que serán “**n**” curvas tantas como “**n**” CHE registradas, es decir, para este caso va de 13 [kg agua/kg de m.s.] hasta 59 [kg agua/kg m.s.], de la *Figura 4.2*.

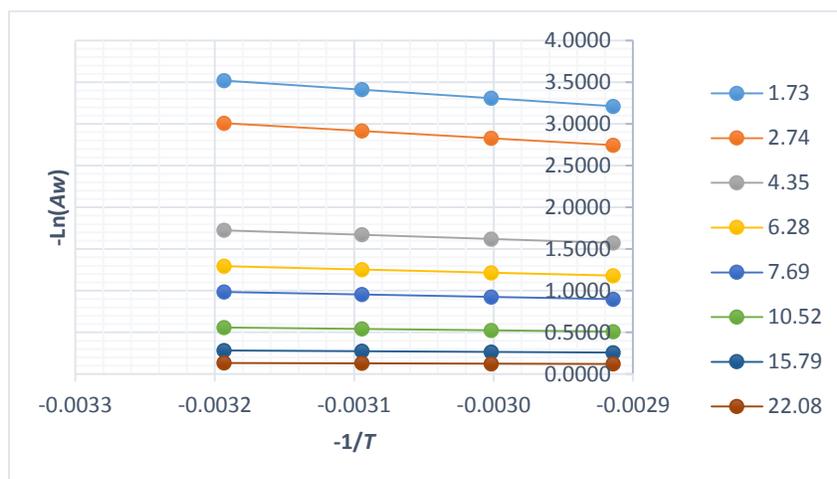


Figura 4.2 Isótera para papa a partir de los datos calculados

La *Figura 4.2*, muestra la representación lineal de $-\ln(A_w)$ frente a $1/T$ de la ecuación de Clausius-Clayeron (*Ecuación 40*), para un valor fijo de CHE. Con la pendiente de cada línea recta se determinó el calor isostérico de sorción, con la cual se estima la relación de la derivada del logaritmo neperiano y la derivada del inverso de la temperatura para cada uno de los puntos asociados a una CHE determinada. Multiplicando el valor de la pendiente por la constante universal de los gases, se obtiene cada uno de los puntos característicos de la curva asociada al calor isostérico.

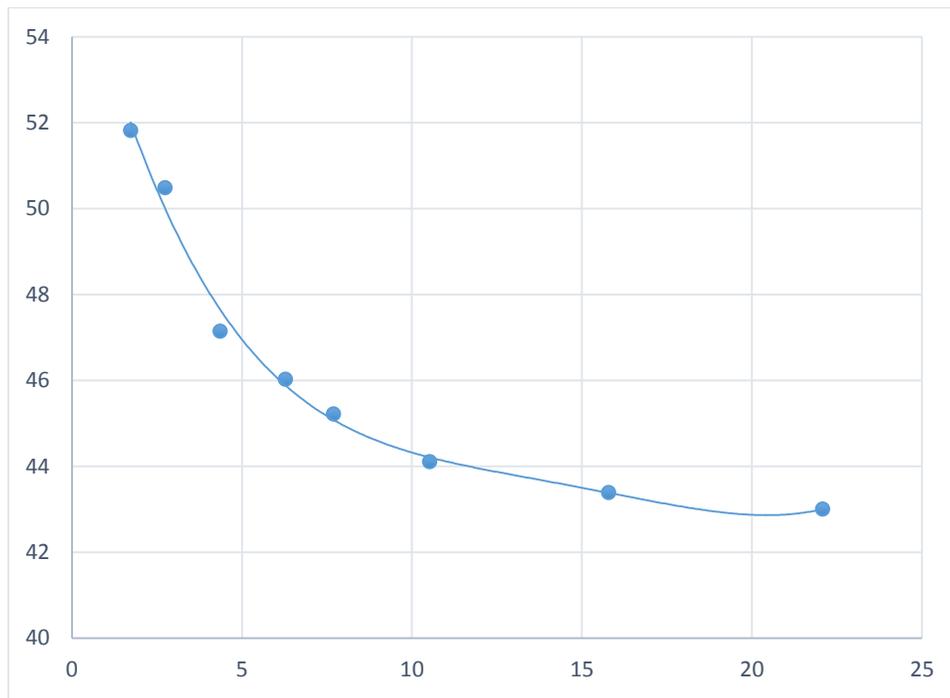


Figura 4.3 Curva de calor isostérico para la papa, Wang et al. [22]

En la *Figura 4.3* se presenta la evolución del Q_{st} frente al CHE. Como se observa el Q_{st} disminuye con el aumento de la CHE, esto indica que a bajos valores de CHE existe una mayor interacción sólido-vapor de agua en los sitios activos de unión en la superficie sólida del bioplástico (producto), debido a que los sitios polares altamente activos están ocupados por la primera capa de moléculas de agua representando alta energía en la interacción molecular. Mientras que al aumentar la humedad el Q_{st} decreció debido a que el agua ocupa menos sitios activos, ocasionando una reducción en la interacción de energía entre las moléculas de agua y el material alimenticio (disminución de las fuerzas de enlace) [14]. Por otra parte, la gran demanda de energía a bajos valores de contenido de humedad, se debe posiblemente a la fuerte resistencia al movimiento del agua desde el interior de la superficie de las muestras; es decir, conforme prosigue la desecación, se llega a un punto en que la superficie de evaporación es insaturada. El punto de evaporación se desplaza dentro del sólido y el proceso de desecación entra al segundo periodo de velocidad decreciente¹². La

¹² En la tesis de Pérez-González [77, pp. 79-81] se detalla sobre las velocidades de deshidratado.

velocidad de desecación está regida ahora por la velocidad del movimiento interno de la humedad, y la influencia de las variables externas deja de ser significativa [53]. Otros investigadores argumentan que se debe posiblemente a la existencia de sitios polares altamente activos en la superficie del material (alimento), que unidos con las moléculas de agua forman la llamada capa monomolecular; además afirman que para eliminar estas moléculas de agua se requiere alta cantidad de energía [14, 54, 11].

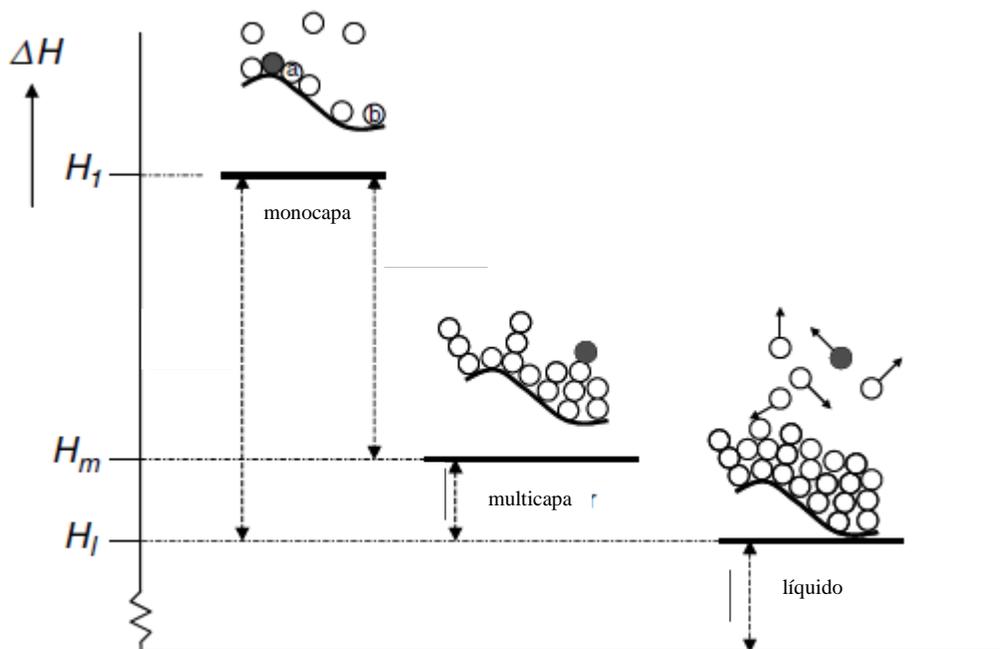


Figura 4.4 Sorción localizada y sus correspondientes niveles de entalpía [54]

El conocimiento del Q_{st} a un CHE constante en procesos de sorción proporciona información sobre el estado del agua en su interacción con la fase sólida del alimento y por tanto, una medida de la estabilidad física, química y microbiológica de los alimentos a unas condiciones determinadas en el almacenamiento [14].

4.1.1.2 Piña, segundo caso

Otro ejemplo es la piña, estudiada por Hossain et al. [25], se analizó bajo la misma dinámica que el caso anterior.

Tabla 4.4 Datos experimentales para la piña analizados por Hossain et al [25]

Aw	20 [°C]	Aw	30 [°C]	Aw	40 [°C]	Aw
0.1107	19	0.1129	16	0.1129	13	0.1150
0.3277	23	0.3255	19	0.3169	16	0.3148
0.5511	29	0.5232	24	0.4995	21	0.4652
0.7573	38	0.7573	34	0.7530	30	0.7487
0.9334	53	0.9076	46	0.8776	39	0.8496
0.9721	59	0.9656	53	0.9635	48	0.9549

Con el Método de Polanyi se estimó el A_w para 30, 40 y 50 [°C]

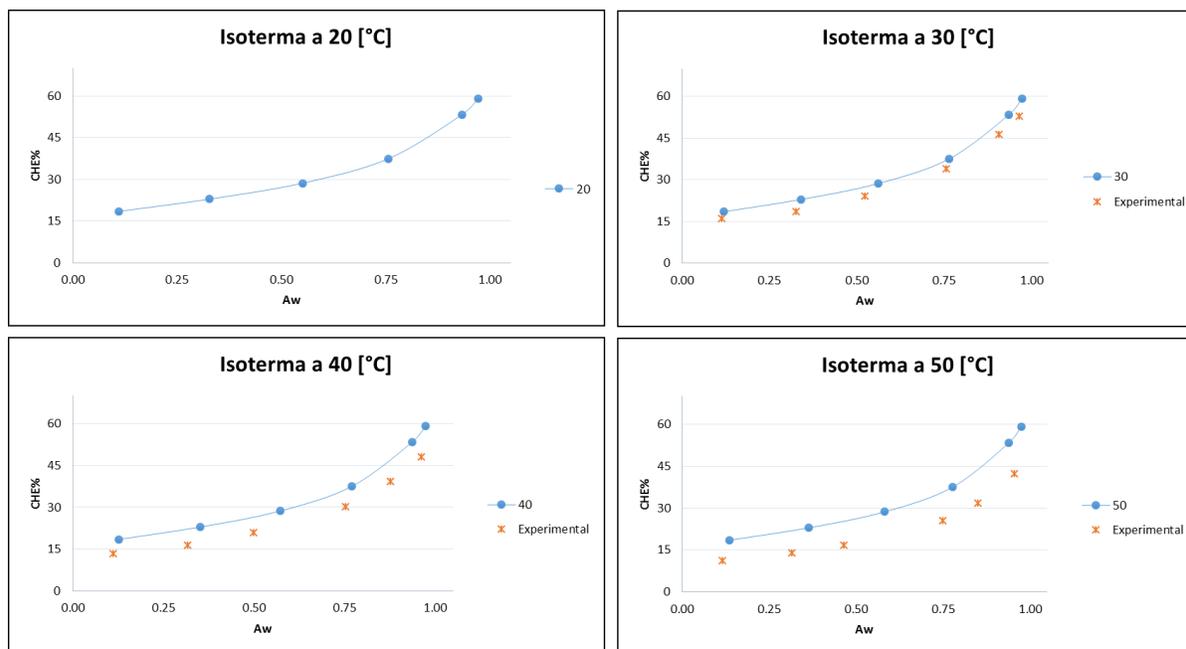


Figura 4.5 Isothermas de desorción calculadas con Método de Polanyi (Piña Hossain et al. [25])

Como se explicó en el capítulo dos (Figura 2.1), las isothermas de sorción se dividen en tres regiones, la región I que corresponde a $A_w < 0.22$ que se relaciona con la sorción de agua en la capa monomolecular, la región II para A_w entre 0.22-0.73 correspondiente a la adsorción de agua en capas adicionales a la monocapa, y la región III A_w entre 0.73-1.0, correspondiente a la condensación de agua en los poros del material seguida por la solubilidad del material [14]. Tal cual se reportó en la Figura 4.1, la disminución de la higroscopía con el aumento de la temperatura, se repite para este caso y el resto de las isothermas analizadas. Algunos investigadores lo atribuyen a las alteraciones químicas y físicas en los productos por el incremento de la temperatura, debido a la disminución de los sitios activos donde se unen las moléculas de agua con la superficie del sólido del alimento [14, 55].

De igual manera que la Figura 4.1 se hizo la comparación de la A_w predicha con el Método de Polanyi y la experimental obtenida por Hossain et al. [25]. De dicho análisis se determinó que el EMR% a 30 [°C] es de 21.47%, a 40 [°C] es de 21.91% y a 50 [°C] es de 24.94%. El calor isostérico se estimó de 24.07 [kJ/kmol].

Los otros productos se analizaron con el mismo procedimiento, en el Apéndice 6 se detallan los resultados obtenidos, para llegar al condensado de la Tabla 4.5, que muestra los resultados estadísticos del EMR% asociado a la construcción de las isothermas por el Método de Polanyi.

Los EMR% están por encima del 10%, para algunos alimentos el error de predicción es muy grande y para otros no tanto. No se podría decir abiertamente que el método funciona como Correa et al. [3, 18] indica en sus trabajos. Sin embargo el cálculo del calor isostérico se

ajusta muy bien para los casos de la manzana, cebolla, zanahoria, durazno y papa, respecto de los reportados en la literatura.

Tabla 4.5 Calor isostérico para diferentes productos, calculado para procesar 10 [kg] de producto fresco, así como el EMR%

Alimentos	Propiedades de sorción		CALCULADOS
			EMR%
JITOMATE, (<i>LYCOPERSICUM ESCULENTUM</i>)	Calor Isostérico [kW]		21.72
	Isotermas [°C]	30	0
	Kiranoudis et al.	45	21.68%
		60	50.58%
	Calor Isostérico [kW]		21.56
	Isotermas [°C]	25	0
	Akanbi et al.	30	13.69%
		40	14.36%
PAPA	Calor Isostérico [kW]		14.43
	Isotermas [°C]	40	0
	Wang et al.	50	11.08%
		60	18.31%
	Calor Isostérico [kW]		14.38
	Isotermas [°C]	30	0
	Kiranoudis et al.	45	15.93%
		60	47.13%
	Calor Isostérico [kW]		13.66
	Isotermas [°C]	30	0
	McLaughlin et al.	45	11.12%
		60	42.90%
	Calor Isostérico [kW]		14.46
	Isotermas [°C]	30	0
Kaymak et al.	45	17.31%	
	60	30.49%	
PIÑA	Calor Isostérico [kW]		24.07
	Isotermas [°C]	20	0
	Hossain et al.	30	21.47%
		40	21.91%
		50	24.94%
DURAZNO	Calor Isostérico [kW]		13.96
	Isotermas [°C]	15	0
	Tsami et al.	30	96.24%

		45	35.34%
		60	18.47%
	Calor Isostérico [kW]		19.98
	Isotermas [°C]	30	0
	Kaymak et al.	45	31.74%
		60	30.10%
ZANAHORIA	Calor Isostérico [kW]		12.40
	Isotermas [°C]	30	0
	Kiranoudis et al.	45	18.75%
		60	41.81%
CEBOLLA	Calor Isostérico [kW]		18.06
	Isotermas [°C]	30	0
	Kiranoudis et al.	45	24.06%
		60	46.86%
MANZANA	Calor Isostérico [kW]		16.76
	Isotermas [°C]	30	0
	Kaymak et al.	45	26.82%
		60	32.12%

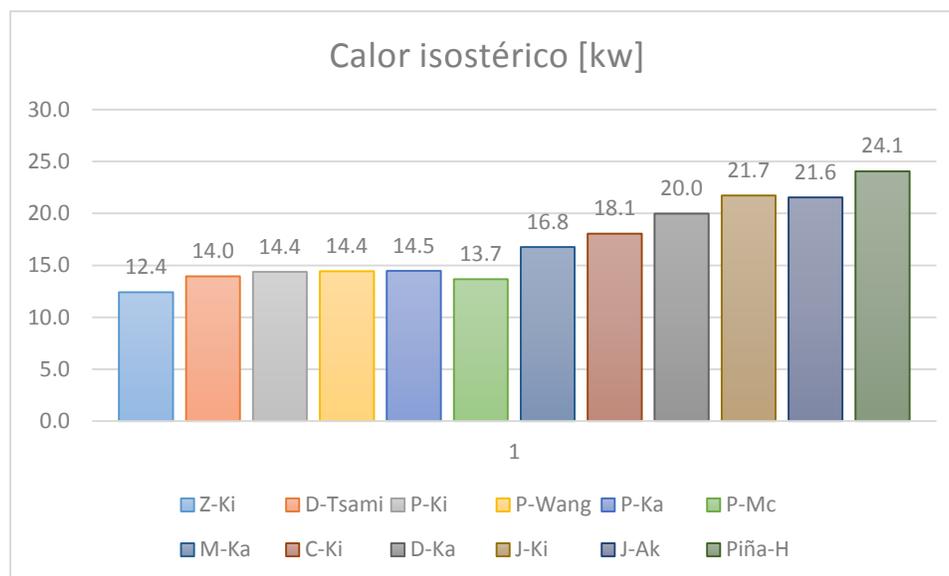


Figura 4.6 Calor isostérico para diversos productos calculado con la ecuación de Clausius Clapeyron

Tabla 4.6 Abreviaturas de la Figura 4.6

Producto-Autor	Abreviación
Jitomate-Kiranoudis	J-Ki
Papa-Kiranoudis	P-Ki
Papa-Wang	P-Wang
Papa-Kaymak	P-Ka
Papa-McLaughlin	P-Mc
Piña-Hossain	Piña-H
Durazno-Kaymak	D-Ka
Durazno-Tsami	D-Tsami
Zanahoria-Kiranoudis	Z-Ki
Cebolla-Kiranoudis	C-Ki
Manzana-Kaymak	M-Ka
Pera-Iglesias	P-Igle
Mango-Váquiro	Ma-Vá

Se puede observar que la piña y la zanahoria son los productos críticos, debido a la mayor y la menor cantidad de energía que demandan para su deshidratación, respectivamente. Para efectos de la estimación del caudal del aire sólo se consideraron las cargas máximas y mínimas, pues de esta manera se garantiza que los otros productos estarán cubiertos energéticamente hablando.

4.2 Caudal del aire

Para la estimación del caudal de aire se consideraron cinco regiones con temperaturas ambientes diferentes.

1. Municipio de Ensenada-Maneadero, Baja California
2. Cerro Prieto, Baja California
3. Chignahuapan, Puebla
4. Compostela, Nayarit
5. Creel, Chihuahua

La información climatológica se extrajo de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ver *Tabla 4.10*. Los datos reportados son los valores máximos de las temperaturas máximas y mínimas, registradas desde 1977 a 2010 para Ensenada-Maneadero, 1964 a 1977 para Cerro Prieto, 1974 a 2009 para Chignahuapan, 1960 a 1976 para Compostela y 1928 a 1998 para Creel¹³. Con la *Ecuación 49*, se calculó el flujo másico de

¹³ Es importante mencionar que en la misma página (<http://smn.cna.gob.mx/es/>) puede accederse a la información de las Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMA's), la información se registra día a día y tiene un periodo máximo de almacenamiento de 24 [hrs.]. Para acceder a la base de datos reportada dirigirse a la pestaña Climatología, Información Climatológica, seleccionar el estado en cuestión y posteriormente ubicar el municipio.

aire mensual para cada una de las temperaturas reportadas y con la carga térmica necesaria para el deshidratado de piña y de zanahoria.

$$V_A = \frac{Q_{st}}{C*(T_0 - T_a)} \quad \text{Ecuación 49}$$

C : Capacidad térmica específica del aire.

T_0 : Temperatura de proceso.

T_a : Temperatura ambiente.

V_A : Caudal del aire.

De la ecuación anterior, puede observarse que el cálculo depende tanto de la temperatura ambiente como de la temperatura ideal de proceso, por lo cual se analizó para un rango de calefacción del aire de 55, 60, 65 y 70 [°C], ya que bajo este rango de temperaturas se garantiza la inocuidad de los alimentos y la calidad nutricional que del proceso propuesto se obtendrán, más adelante se definirá la temperatura y velocidad ideal para dicho proceso.

Para una primera iteración con una temperatura de proceso de 55 [°C] y para cada una de las temperaturas ambientales promedio (máximas y mínimas) de las cinco localidades analizadas se generaron los datos de la *Tabla 4.7*. De dicha tabla se seleccionarán las columnas en el extremo, el flujo másico máximo de la piña y el mínimo para la zanahoria, ya que representan los valores máximos máximos y mínimos mínimos, respectivamente. Una vez hecho esto, los flujos másicos se ponen como constantes para cada uno de los sitios, analizando que tanta energía es necesaria suministrar al aire para alcanzar las condiciones operativas de proceso.

Tabla 4.7 Flujos másicos de aire por producto y por temperaturas ambiente registradas por localidad, para una temperatura de proceso de 55 [°C]

Localidades	PIÑA		ZANAHORIA	
	Q [kW]	24.07	Q [kW]	12.40
	m air MAX	m air MIN	m air MAX	m air MIN
	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]
Ensenada, B.C.	1.224	0.472	0.631	0.243
Cerro Prieto, B.C.	2.209	0.489	1.138	0.252
Chignahuapan, Pue.	0.989	0.406	0.509	0.209
Compostela, Nay.	1.298	0.517	0.669	0.266
Creel, Chih.	1.045	0.364	0.539	0.187

Tabla 4.8 Energía térmica necesaria a suministrar para cada una de las localidades en función del flujo másico del aire establecido; temperatura de proceso 55 [°C]; mínimo de energía a alcanzar 24.07 [kW]

Localidades	Flujo másico de aire [kg/s]				
	0.99	1.05	1.22	1.30	2.21
Ensenada, B.C.	19.8	20.9	24.5	26.0	44.3
Cerro Prieto, B.C.	14.2	15.0	17.6	18.6	31.7
Chignahuapan, Pue.	24.8	26.2	30.7	32.6	55.4
Compostela, Nay.	18.6	19.6	23.0	24.4	41.5

Creel, Chih.	23.5	24.9	29.2	30.9	52.6
---------------------	------	------	------	------	------

Tabla 4.9 Energía térmica necesaria a suministrar para cada una de las localidades en función del flujo másico del aire establecido; temperatura de proceso 55 [°C]; mínimo de energía a alcanzar 12.40 [kW]

Localidades	Flujo másico de aire [kg/s]				
	0.27	0.25	0.24	0.21	0.19
Ensenada, B.C.	13.70	12.95	12.49	10.76	9.64
Cerro Prieto, B.C.	13.41	12.68	12.23	10.53	11.17
Chignahuapan, Pue.	15.87	15.01	14.48	12.47	11.17
Compostela, Nay.	12.50	11.83	11.41	9.82	8.80
Creel, Chih.	17.92	16.95	16.35	14.08	12.61

Para el caso de la zanahoria el calor requerido es de 12.40 [kW], para esta iteración el flujo másico sombreado en color amarillo es el mínimo necesario que satisface dicha demanda energética para las cinco localidades; mientras que para la piña el valor es de 1.2 [kg/s], Figura 4.7.

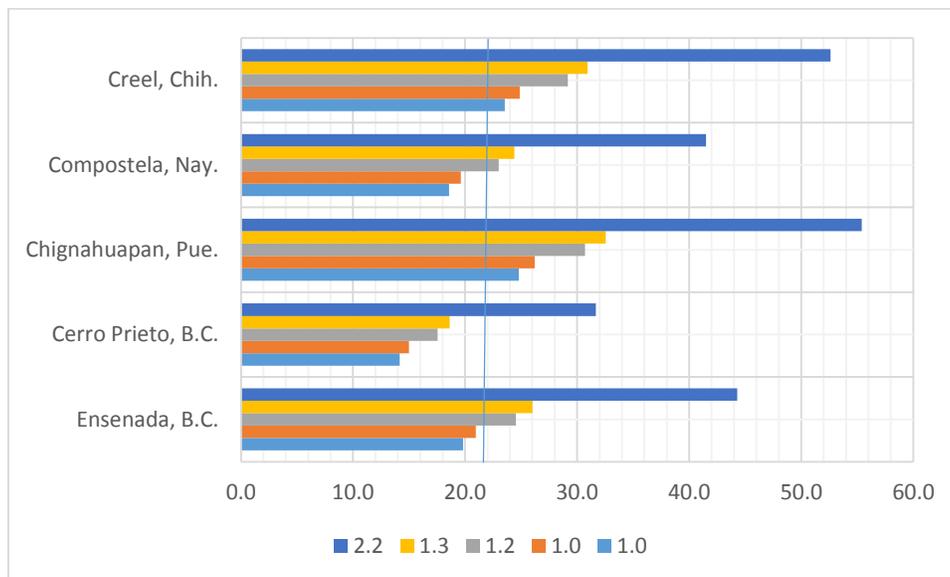


Figura 4.7 Comparación de la carga térmica lograda por localidad a diferentes flujos másicos de aire; para una temperatura de proceso de 55 [°C]

Como se mencionó anteriormente es necesario iterar para las temperaturas de proceso a 60, 65 y 70 [°C]. Los flujos másicos obtenidos de dichas iteraciones se presentan en la Figura 4.8

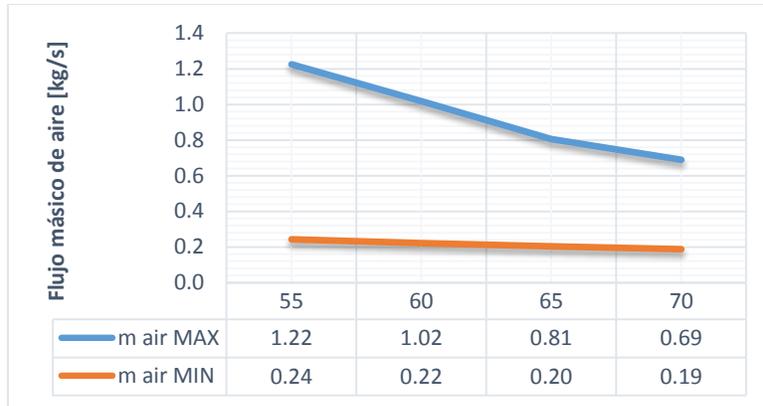


Figura 4.8 Demanda de flujo másico de aire en función de la temperatura de operación (55, 60, 65, 70 [°C]), datos de la Tabla 4.10

En el Apéndice, sección 6.12, se proponen cinco opciones de equipos comerciales que pueden suministrar el flujo de aire necesario acorde a los resultados de la Figura 4.8.

Tabla 4.10 Información climatológica por localidad, disponible en <http://smn.cna.gob.mx/es/>

Mes	Ensenada-Maneadero, Baja California		Cerro Prieto (CFE), Baja California		Chignahuapan, Puebla		Compostela, Nayarit		Creel, Chihuahua	
	T MAX [°C]	T MIN [°C]	T MAX [°C]	T MIN [°C]	T MAX [°C]	T MIN [°C]	T MAX [°C]	T MIN [°C]	T MAX [°C]	T MIN [°C]
Enero	32.0	-4.0	31.5	-8.5	27.0	-11.0	36.0	0.8	25.0	-21.3
Febrero	33.0	1.5	32.5	-1.0	28.0	-10.0	34.0	3.0	27.0	-21.0
Marzo	36.0	1.5	38.5	0.5	30.0	-3.5	39.0	5.0	27.0	-23.0
Abril	39.5	4.0	39.5	4.0	32.0	-6.0	39.5	5.0	31.0	-11.0
Mayo	33.0	5.0	45.0	8.5	33.0	0.0	39.5	8.5	37.0	-9.5
Junio	40.0	9.0	49.0	11.5	31.0	-1.0	38.5	11.5	37.0	-12.0
Julio	32.5	7.5	49.0	15.0	29.0	2.0	36.0	14.0	38.0	1.0
Agosto	35.0	10.0	48.0	16.0	29.0	2.0	34.0	14.0	32.0	1.6
Septiembre	36.0	9.0	47.5	11.5	26.0	-4.0	35.0	13.0	34.0	-3.0
Octubre	37.0	5.0	45.0	6.0	40.0	-5.0	35.0	11.0	30.0	-8.5
Noviembre	35.0	1.5	34.0	0.0	26.0	-6.0	34.5	8.5	29.0	-13.0
Diciembre	32.0	-3.0	29.5	-3.5	30.0	-8.0	35.0	6.0	29.0	-22.5
Promedio[°C]	35.08	3.92	40.75	5.00	30.08	-4.21	36.33	8.36	31.33	-11.85

5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CONCLUSIONES

En este capítulo se discutirán los resultados obtenidos anteriormente; como se puede observar, las múltiples variables que intervienen en el proceso, deben de ajustarse con la finalidad de establecer los parámetros operativos ideales, para el deshidratado de alimentos. Este trabajo pretende armonizar las variables fisicoquímicas y mecánicas para garantizar deshidratados seguros (bajas cuentas bacterianas), de alta calidad (olores, sabores, texturas, agradables al gusto, entre otros) y con gastos energéticos mínimos necesarios para dicho proceso.

Al final de este capítulo se presentan las conclusiones, las cuales se erigen sobre dos objetivos principales que se lograron con este trabajo. El primer objetivo se refiere a la validación del Método de Polanyi aplicado a la dinámica desortiva de alimentos. El segundo objetivo es definir un esquema de deshidratado, es decir, definir el valor cuantitativo de las principales variables que deben considerarse, temperatura, velocidad del aire y espesor de rebanadas. Estos tres factores afectan directamente en la calidad fisicoquímica y bioquímica de los productos deshidratados.

5.1 Resultados

Existen diversos criterios para tomar una decisión. En este trabajo se empleó una **Matriz Analítica de Comparación (MAC)**, su propósito es medir el impacto que tienen las variables externas sobre la calidad del producto final. La MAC es una herramienta que también puede ser utilizada en la planificación de calidad para la selección de productos/servicios, características y objetivos, así como para el desarrollo de procesos y/o calificar las distintas alternativas posibles. Debido a la versatilidad con la que se pueden analizar las fuerzas de las relaciones entre conjuntos de información.

En este análisis se compararon las condiciones operativas, temperaturas (50, 55, 60, 65 y 70 [°C]), velocidad del aire (0.50, 0.90, 1.25, 1.30 y 2.00 [m/s]) y espesor de las muestras (3, 5, 7, 9, 11 [mm]), ponderando los factores claves de éxito para la definición de las condiciones ideales de deshidratación con la siguiente escala:

1=Imprescindible 2=Muy necesario 3=Necesario 4=Innecesario 5=Prescindible

Tabla 5.1 Matriz Analítica de Comparación (MAC)

Sucesos Investigados	P.	Temperatura del aire [°C]										Velocidad del aire [m/s]										Espesor de la rebanada [mm]									
		50		55		60		65		70		0.50		0.90		1.25		1.30		2.00		3		5		7		9		11	
		C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP	C	CP
Control microbiano	1	5	5.0	4	4.0	2	2.0	1	1.0	1	1.0	4	4.0	3	3.0	2	2.0	2	2.0	1	1.0	1	1.0	2	2.0	3	3.0	4	4.0	5	5.0
Desnaturalización vitamina C	1	1	1.0	2	2.0	3	3.0	4	4.0	5	5.0	5	5.0	4	4.0	3	3.0	2	2.0	1	1.0	5	5.0	4	4.0	3	3.0	2	2.0	1	1.0
Pérdida de licopeno	1	1	1.0	1	.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0	1	1.0
Vida de anaquel & licopeno residual	2	1	0.5	2	1.0	3	1.5	4	2.0	4	2.0	5	2.5	4	2.0	3	1.5	2	1.0	1	0.5	5	2.5	4	2.0	3	1.5	2	1.0	1	0.5
Hidroximetilfurfural (HMF)	3	1	0.3	1	0.3	1	0.3	1	0.3	2	0.7	2	0.7	2	0.7	2	0.7	2	0.7	2	0.7	3	1.0	3	1.0	3	1.0	3	1.0	3	1.0
Reacción de Maillard	3	1	0.3	2	0.7	2	0.7	3	1.0	4	1.3	3	1.0	3	1.0	3	1.0	3	1.0	2	0.7	3	1.0	3	1.0	3	1.0	3	1.0	3	1.0
Cambios en el color	2	1	0.5	2	1.0	2	1.0	3	1.5	4	2.0	2	1.0	2	1.0	2	1.0	2	1.0	2	1.0	2	1.0	2	1.0	2	1.0	2	1.0	2	1.0
Almidón resistente	2	1	0.5	2	1.0	2	1.0	3	1.5	4	2.0	5	2.5	4	2.0	3	1.5	3	1.5	1	0.5	5	2.5	4	2.0	3	1.5	2	1.0	1	0.5
Minerales	5	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2
Encogimiento	3	5	1.7	3	1.0	2	0.7	1	0.3	1	0.3	5	1.7	4	1.3	3	1.0	1	0.3	1	0.3	5	1.7	4	1.3	3	1.0	2	0.7	1	0.3
Porosidad	3	5	1.7	3	1.0	2	0.7	1	0.3	1	0.3	5	1.7	4	1.3	3	1.0	1	0.3	1	0.3	5	1.7	4	1.3	3	1.0	2	0.7	1	0.3
			12.7		13.2		12.0		13.2		15.9		21.2		17.5		13.9		11.0		7.2		18.5		16.9		15.2		13.5		11.9

C: Calificación

CP: Calificación Ponderada

5.1.1 Discusión y análisis de las condiciones operativas propuestas

De la MAC, las condiciones operativas con menor acumulación de puntos, indican que son las ideales para el deshidratado. La calificación que se le asignó a los sucesos investigados tuvo como fundamento los resultados presentados en los capítulos anteriores y discutidos en este capítulo.

5.1.1.1 Control microbiano

En el apartado referente al control microbiano se asignaron las mayores calificaciones a los valores de menor temperatura, descendiendo la calificación hasta llegar a 70 [°C]. Como se aprecia en la *Tabla 3.1*, el valor mínimo permisible para el crecimiento bacteriano es 44 [°C], pero entre mayor sea la temperatura menor serán las probabilidades de tener alimentos contaminados. Por otro lado, la velocidad del aire acelera el proceso de deshidratado [47], esto se traduce en menos tiempo de proceso; pero si el tiempo de proceso es extenso, aumentan las probabilidades de contaminación por algún otro factor externo. Contario a la afirmación anterior, un mayor espesor ralentizará el tiempo de deshidratado, aumentando el riesgo de contaminación.

5.1.1.2 Desnaturalización de la vitamina C

La calidad nutrimental que un alimento deshidratado puede aportar es significativo, sobre todo si se pretende vender como un producto orgánico y nutritivo. Los resultados experimentales principalmente reportados por Zanoni B. et al. [19, 45, 38] y Khazaei et al. [37], confirman la cualidad termosensible del ácido ascórbico reflejada en la rápida desnaturalización si el alimento se somete a altas temperaturas, comparado con el deshidratado a 50 [°C]; por esta razón se ponderó con menor calificación a dicha temperatura y con mayor calificación a 70 [°C]. Como se analizó anteriormente para un régimen mayor de velocidad y para un menor espesor de la rebanada los tiempos de deshidratado se reducen, de tal manera que el orden de la menor ponderación obedece al criterio para un menor tiempo de proceso, lo que significa una menor oportunidad de pérdida de ácido ascórbico.

5.1.1.3 Pérdida de licopeno

En la *Figura 3.4* y *3.5* la degradación del licopeno durante el proceso no se ve afectada significativamente, por el contrario, la concentración aumenta ya que la cantidad de agua disminuye. Particularmente la afección de la temperatura respecto a ese suceso químico no es relevante, primeramente por que los resultados provienen de corridas experimentales para jitomate deshidratado a 80 y 110 [°C], son mayores que las analizadas en la MAC donde la máxima temperatura es de 70 [°C]. De manera general para las otras dos variables, velocidad del aire y espesor de la rebanada del producto, su afección en la calidad del producto es poco significativa.

5.1.1.4 Vida de anaquel y licopeno residual

Resulta interesante abordar este punto debido a que la deshidratación se está presentando como un método práctico y milenario para la conservación de alimentos; sin embargo, aún en nuestros días está sujeto de ser perfectible. Por esta razón, determinar por así decirlo, la fecha de caducidad del alimento es indispensable. Proponer un buen mecanismo de

almacenamiento implica controlar las variables estrictas del almacenamiento, por ejemplo la cantidad de luminiscencia, humedad relativa y temperatura del recinto [45]. Sin embargo, en la *Tabla 3.4*, se aprecia que si la muestra de jitomate se procesó a altas temperaturas, la degradación nutrimental desciende rápidamente comparada con las muestras tratadas a menor temperatura pese a tener las variables de almacenamiento perfectamente controladas. En dicha tabla se representan las temperaturas de 80 y 110 [°C], por lo que para 70 [°C] es de esperarse que la vida de anaquel sea mayor a 90 días, pudiéndose incrementar con el diseño de empaques hipoalergénicos y el control de las variables inherentes al mecanismo de almacenamiento. Por tal razón, su ponderación es descendiente de 70 [°C] a 50 [°C]. Las otras dos variables se ponderan bajo el mismo criterio de la vitamina C.

5.1.1.5 Producción de Hidroximetilfurfural (HMF)

Se mencionó que el HMF es un agente considerado carcinogénico, la presencia de dicha sustancia estimula las reacciones de Maillard por la incapacidad de brindar una protección contra los radicales libres que oxidan la materia orgánica. Cabe mencionar que el HMF ha sido detectado en los compuestos aromáticos durante la combustión del tabaco [56, 57]. Con esto no se pretende estigmatizar el consumo de HMF, pues prácticamente está presente en la mayoría de alimentos cocinados a altas temperaturas como la carne, papas fritas, entre otros, pero de ser posible, se recomienda reducir o evitar su consumo. Por otro lado, la miel debe su calidad a la cantidad de HMF que contenga, ya que indica las condiciones en que ha sido almacenada, su tratamiento y su edad; cantidades superiores a los 40 [mg de HMF/kg de miel] indican mieles viejas, de baja calidad y/o excesivamente calentadas o adulteradas [58].

Para la ponderación de este suceso, se categorizó de menor a mayor conforme el incremento de la temperatura, se optó por no variar mucho la calificación en vista que a 80 [°C] la producción de HMF en jitomates no supera los 36 [mg de HMF/kg ST]¹⁴, afirmando así que, para temperaturas menores o iguales a 70 [°C] la producción de HMF no excede los límites establecidos por la Norma Mexicana de Miel¹⁵. Puede resultar cuestionable la comparación entre miel y jitomate deshidratado, pero por la falta de una normativa a nivel nacional que proporcione parámetros de calidad como referencia para frutas deshidratadas [49, p. 32] se recurrió a esta norma como parámetro de referencia; al final se concluye que el mismo compuesto activo que ambos productos tienen, representan un riesgo para la salud y la concentración de dicho compuesto ya está regulado.

Respecto a la velocidad de aire y el espesor de las rebanadas, se ponderaron equitativamente debido a que la literatura no aporta información contundente sobre su afección en el alimento por la producción de HMF.

¹⁴ ST: Sólidos Totales

¹⁵ Dicha norma se complementa con las siguientes normas vigentes:

NOM-051-SCFI-1994

NOM-092-SSA1-1994

NOM-110-SSA1-1994

NOM-111-SSA1-1994

5.1.1.6 Reacción de Maillard

Los aromas y sabores modificados, asociados a la reacción de Maillard, catalogan al alimento como rico u horrible, dependiendo de su naturaleza. En los alimentos deshidratados se buscan notas de sabor frescas, verdes y sabores dulces [49], que normalmente se pierden en el deshidratado debido a las temperaturas de trabajo y por la sensibilidad de los compuestos como carotenoides y ácidos grasos¹⁶. Por esta razón la mayor calificación la reciben temperaturas altas mientras que las otras dos variables se ajustaron al criterio del HMF.

5.1.1.7 Cambios en el color

La pérdida de pigmentación está relacionada con el daño por oxidación al tejido, y a su vez éste se encuentra relacionado con la reacción de Maillard. Por otro lado, como se explicó en la sección 3.1.5, para exposiciones prolongadas del alimento a altas temperaturas, se incrementará la oxidación de pigmentos y el obscurecimiento enzimático y no enzimático. Horuz et al. [48] confirma lo anterior en su trabajo, comparando el cambio de color para dos diferentes métodos de deshidratado: aire caliente y microondas.

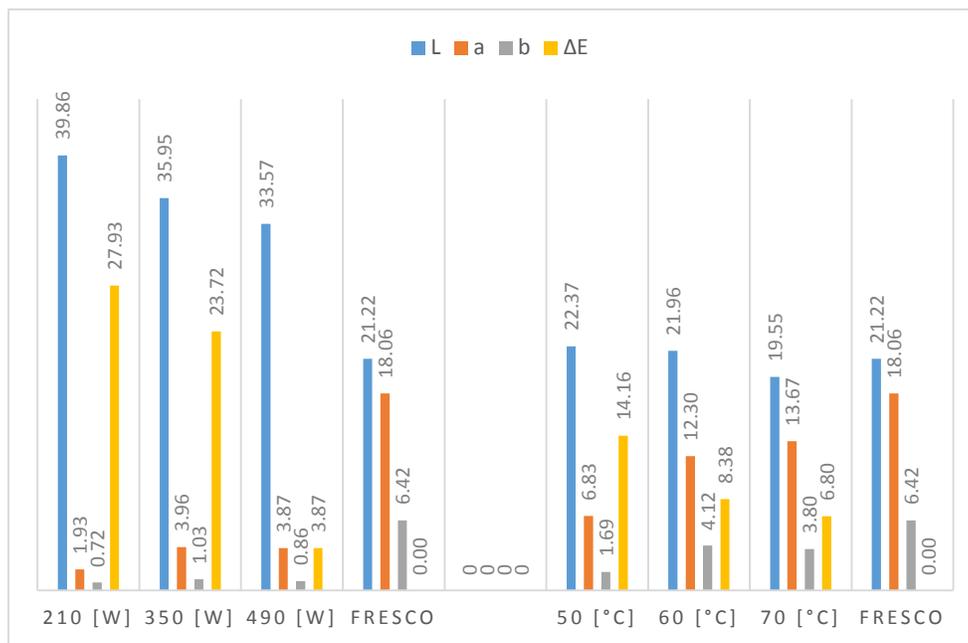


Figura 5.1 Indicadores de color Hunter. Granada deshidratada (*Punica granatum*) con microondas a diferentes potencias y aire caliente a diferentes temperaturas, comparados con los parámetros estimados para el producto en su estado fresco [48]

Puede apreciarse que, a mayor potencia o temperatura la afección en el cambio de color es inferior comparado con los casos contrarios. Esto se debe principalmente a los breves tiempos de exposición del alimento, ya que el proceso de deshidratado no demora tanto como a 210

¹⁶ Carmona-López, Yazmin [49], caracterizó sensorialmente y microbiológicamente, entre otros productos, jitomate deshidratado por el grupo iiDEA y de muestras comerciales.

[W] de potencia o 50 [°C]. De tal manera que el criterio de ponderación es igual al asignado a la reacción de Maillard.

5.1.1.8 Producción de almidón resistente

La principal causa de alteración de la calidad de los alimentos deshidratados, reside en la modificación de su textura; como se discutió en la sección 3.1.5, el almidón resistente es benéfico para la salud y la formación de dicho compuesto se debe a la alteración de la estructura, debido a la gelatinización del almidón. Usualmente, en los procesos de deshidratación los alimentos se someten a pretratamientos para la fijación de color por medio de escaldados, o se adicionan concentraciones bajas de metabisulfito de sodio [51, 17]. Por otra parte, la temperatura y la velocidad de deshidratación ejercen un efecto determinante sobre la textura de los alimentos. En general, las velocidades de deshidratación rápidas y las temperaturas elevadas provocan mayores cambios, comparados con las velocidades de deshidratación lentas y temperaturas bajas [50, 46, 43, 59]. Por esta razón, el criterio de ponderación es asignar menor calificación a las velocidades y grosores de mayor denominación en la MAC; sin embargo, para la temperatura se consideraron los resultados experimentales de Arici et al. [41] donde se reporta, que con una temperatura de 50 [°C] y una velocidad del aire de 2 [m/s] hay una mayor producción de almidón resistente comparado con corridas experimentales practicadas a 40 y 60 [°C] y flujos de velocidad de 0.5 y 1.25 [m/s]; ponderando con menor calificación a la temperatura de 50 [°C] y mayor calificación a las temperaturas siguientes.

5.1.1.9 Concentración o pérdida de minerales

La concentración o pérdida de minerales en la deshidratación es muy variable ya que mientras la concentración de ciertos minerales aumenta la de otros disminuye. Partiendo del hecho que todos son importantes para la salud pero también, considerando que los organismos son diferentes, se acordó ponderar con la menor calificación a las tres variables externas: temperatura, velocidad y espesor, con la intención de no afectar parcialmente el resultado. Sin embargo, es importante mencionar estos resultados, ya que son punto de partida para futuras investigaciones en temas más especializados.

5.1.1.10 Encogimiento y Porosidad

En la sección 3.1.5.2, se concluyó que la inhibición del encogimiento en los deshidratados, se debe al origen de estructuras porosas por los tratamientos térmicos altos y tiempos de deshidratado largos. Ambos sucesos se ponderaron de manera similar para las tres variables, y con el siguiente esquema, menor calificación a las temperaturas, velocidades y grosores con denominaciones altas, es decir, 70 [°C], 2 [m/s] y 11 [mm].

Es importante mencionar que el encogimiento y la porosidad están íntimamente relacionadas con otra cualidad que se busca en los alimentos deshidratados, la cual se refiere a la rehidratación. La rehidratación es una importante propiedad que permite entender la calidad del proceso de deshidratación; Por supuesto es considerada como una medida de los cambios fisicoquímicos. Serdar et al. [46] determinó que la capacidad de rehidratación se ve afectada si la velocidad y temperatura del aire disminuye. Esto se debe principalmente a los cambios en la estructura; si la superficie del alimento carece de poros, quiere decir que la estructura

colapsó y se verá reflejado en su encogimiento, por lo tanto la penetración del agua al tejido en un proceso de rehidratación se verá afectada por las escasas cavidades y poros presentes en el tejido.

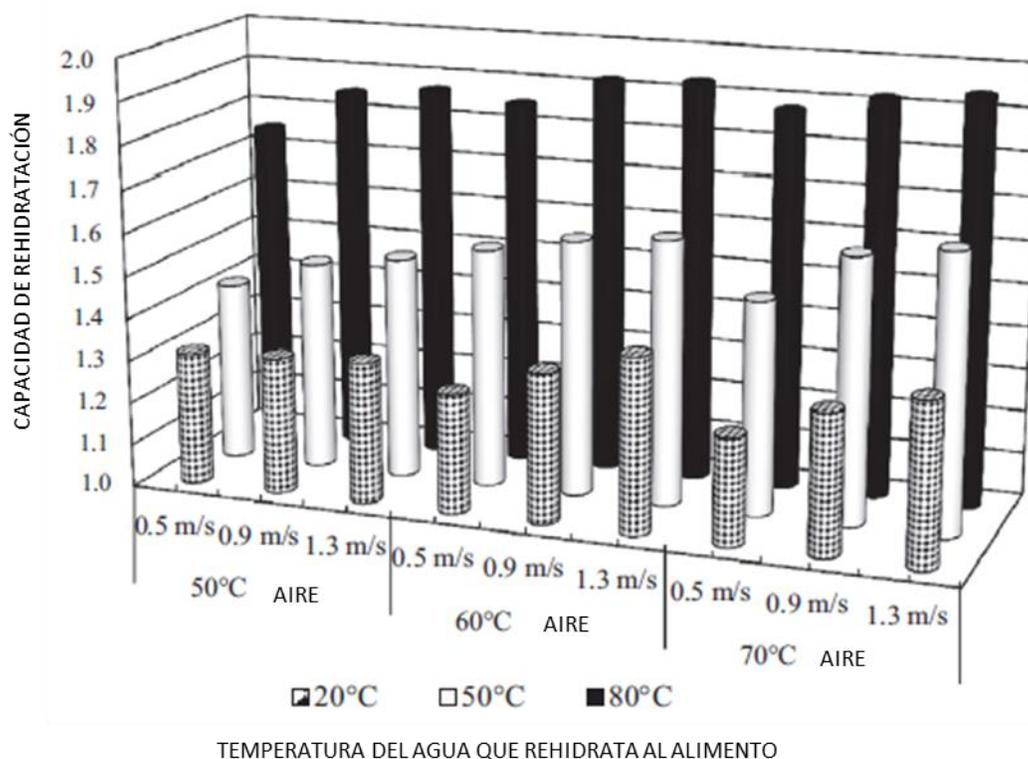


Figura 5.2 Capacidad de Rehidratación a diferentes temperaturas y velocidades del aire [46]

5.2 Propuesta final

De la MAC se concluye que la temperatura ideal para el deshidratado es 60 [°C] (calificación ponderada final de 12.0 unidades), con una velocidad del aire de 2 [m/s] (calificación ponderada final de 7.2 unidades) y un grosor de rebanada de 11 [mm] (calificación ponderada final de 11.9 unidades). Estas son las condiciones ideales generales para el margen de alimentos que se analizaron, bajo los cuales la calidad del producto será adecuada y segura para su consumo.

Usualmente el proceso de deshidratación en la industria se lleva a cabo bajo las siguientes condiciones, entre 60 [°C] y 110 [°C], con una velocidad de aire de 0.5 [m/s] y 2 [m/s], reportando tiempos de deshidratación de 2 [hrs.] a 10 [hrs.] [38]. Bajo estas condiciones se puede garantizar la inhibición del crecimiento bacteriano; sin embargo, consumir un alimento inocuo, no quiere decir que sea nutritivo y seguro del todo, haciendo mención al HMF abundante en alimentos deshidratados a altas temperaturas.

Hasta principios de este siglo, la literatura científica carecía de información sobre los efectos del daño por oxidación térmica en alimentos deshidratados y la Industria se ha estado

preocupando en la optimización del proceso para reducir tiempos y aumentar producción, dejando de lado la calidad del producto.

5.3 Conclusiones

Este trabajo conjuga dos partes importantes del proceso de deshidratación de alimentos que hasta el momento no se habían analizado en conjunto, la parte fisicoquímica y la parte bioquímica.

La validación del Método de Polanyi para el análisis de curvas isotérmicas en alimentos no fue del todo exitosa, ver resultados de la *Tabla 4.5*. La diferencia de los datos calculados, comparados con los experimentales reportados para cada uno de los autores consultados, presentan un EMR% superior al 10%, técnicamente se puede considerar como un método poco preciso en la predicción del fenómeno desortivo. Sin embargo, la facilidad de cómputo permite tener una idea general del comportamiento adsortivo-desortivo para diferentes alimentos, ya que los modelos de predicción usados por excelencia dependen de parámetros no tan sencillos de estimar, situación completamente distinta con el Método de Polanyi.

Para los ejemplos estudiados se encontró que Polanyi no pudo ajustar de manera adecuada la evolución del proceso a temperatura constante y con A_w variable. Sin embargo se cotejo los resultados parciales que presenta Correa et al. [18, 60] y el método ajusta adecuadamente, ver Anexo 6.10, *Tabla 6.1*.

Si bien es cierto que las isotermas de sorción calculadas con el Método de Polanyi reducen el tiempo experimental. La predicción de los datos generados es considerada como aceptable para determinados alimentos, pero permite tener una buena aproximación del calor isostérico en general para los alimentos estudiados.

Con la validación del Método de Polanyi, fue posible continuar con la determinación de la cantidad de energía térmica requerida para el deshidratado de un producto alimenticio a través de la ecuación de Clausius-Clapeyron.

La calidad nutrimental y microbiológica se da en función de variables múltiples como la temperatura, espesor, humedad y/o la naturaleza del tejido celular bajo el que se constituye cada uno de los diferentes alimentos. La Matriz Analítica de Comparación es una herramienta que permite conjugar cada uno de los elementos analizados, dependiendo de los atributos organolépticos buscados.

La MAC quedar como el antecedente para futuros análisis multivariados de otro tipo de productos alimenticios, como cárnicos bovinos, avícolas o marinos.

5.4 Recomendaciones y trabajos futuros

Estudiar las condiciones ambientales en la fase de almacenamiento y tipo de envasado para los alimentos procesados. Los trabajos de Zaroni B. et al. [45, 38] indican que no basta con diseñar un buen proceso de deshidratado, ya que durante el proceso de envasado y almacenamiento del producto, los factores ambientales afectarán su vida de anaquel.

Generar una norma que regule el procesamiento de alimentos deshidratados en México. Es importante mencionar que la parte sensorial y microbiológica ya ha sido analizada para jitomate, mango y guayaba en la tesis de Carmona-López [49], presentando resultados experimentales y estadísticos de dichos productos. Cabe mencionar que un buen producto comienza con el modo de preparación, para ello se recomienda diseñar un Procedimiento Operativo Estandarizado (POE) para mejorar el control bacteriano previo a la deshidratación.

A partir de un prototipo experimental y con la finalidad de un escalamiento para la construcción de un sistema deshidratador industrial, se recomienda hacer una adimensionalización. Lo cual implica un vasto trabajo de experimentación y corroboración de dichos datos a través de métodos numéricos.

Por otro lado, uno de los principales problemas en la industria, es la falta de un diseño adecuado que garantice flujos de aire calientes homogéneos a lo largo de toda la cámara de deshidratado. Para ello es necesario recurrir a simulaciones de flujo computacionales. CFD (Computational Fluid Dynamics) ha sido un método exitoso para la predicción de los fenómenos de deshidratado, el cual se vale de los diferentes métodos de deshidratado como son la aspersión, liofilización, aire caliente y superficie caliente.

Se mencionó la pérdida de vitamina C asociada a temperaturas altas y delgados espesores de rebanadas, primeramente es necesario hacer notar que el gráfico de la *Figura 3.1* sólo hace mención al comportamiento del jitomate; sin embargo, los alimentos que se presentan en la *Tabla 3.3* pueden tener un comportamiento similar, hipótesis basada en lo ya estudiado en la sección 3.1.2, por esta razón se recomienda experimentar con dichos alimentos y ejecutar deshidratados siguiendo las mismas variables y condiciones operativas para validar la hipótesis planteada. De igual manera se sugiere corroborar mediante la experimentación la hipótesis del espesor crítico.

6 APÉNDICE

Apéndice 1 Validación del Método de Polanyi

A continuación se presentan los resultados de los diferentes productos que se analizaron con el Método de Polanyi.

6.1 Jitomate (*Lycopersicum esculentum*) de Kiranoudis.

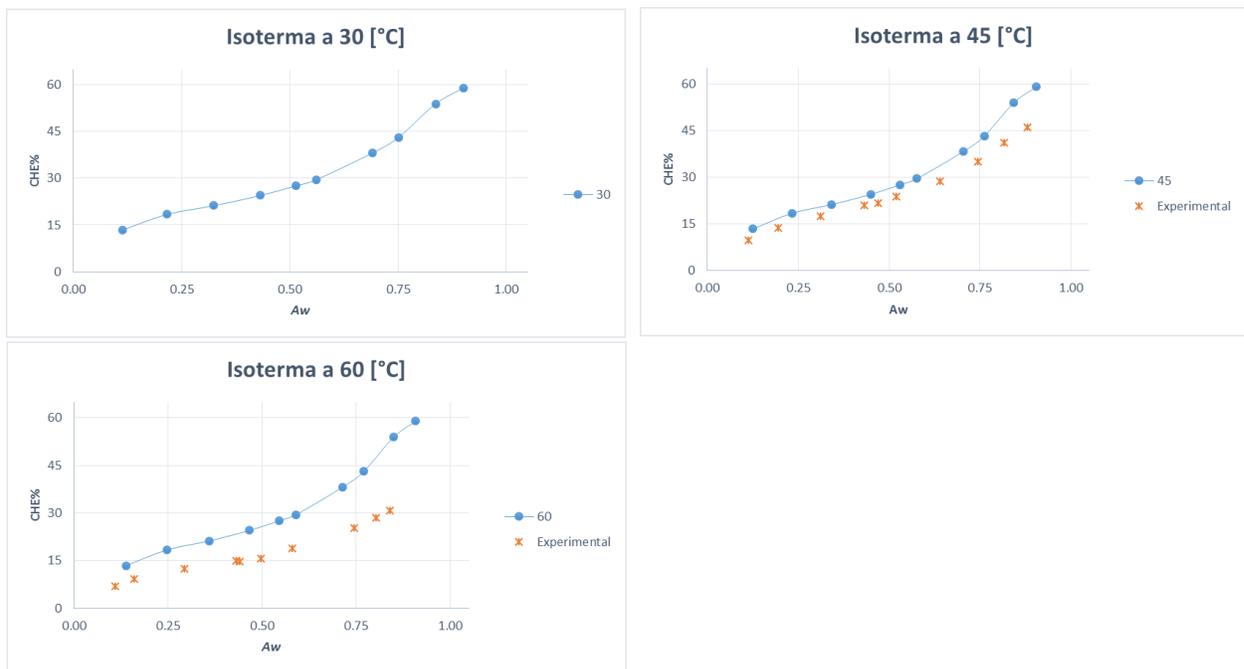


Figura 6.1 Isothermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, jitomate (Kiranoudis et al. [51])

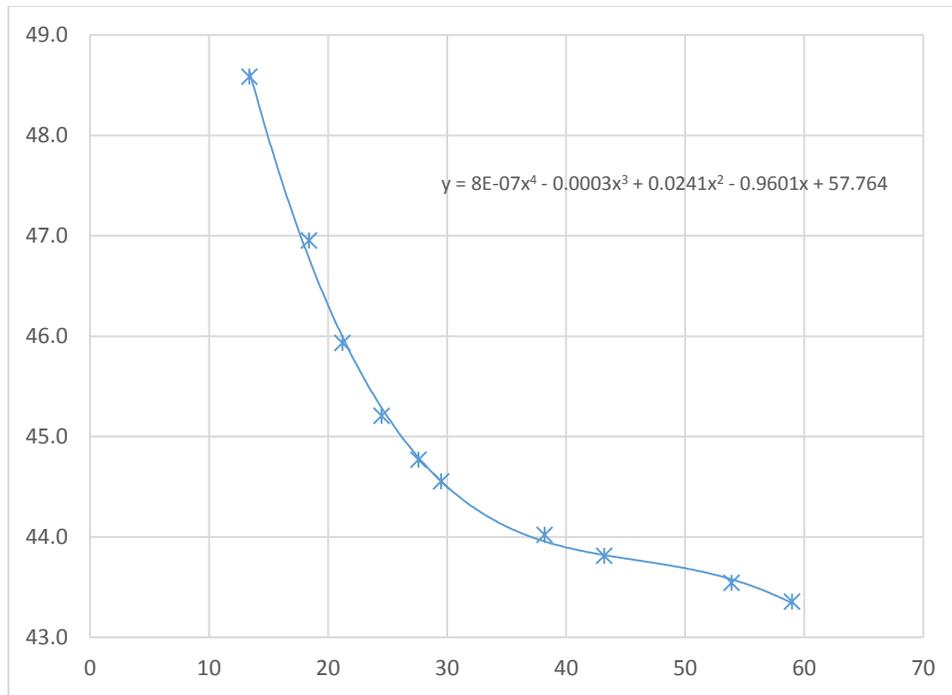


Figura 6.2 Curva de calor isostérico jitomate (Kiranoudis et al. [51]) calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.2 Jitomate (*Lycopersicum esculentum*) de Akanbi

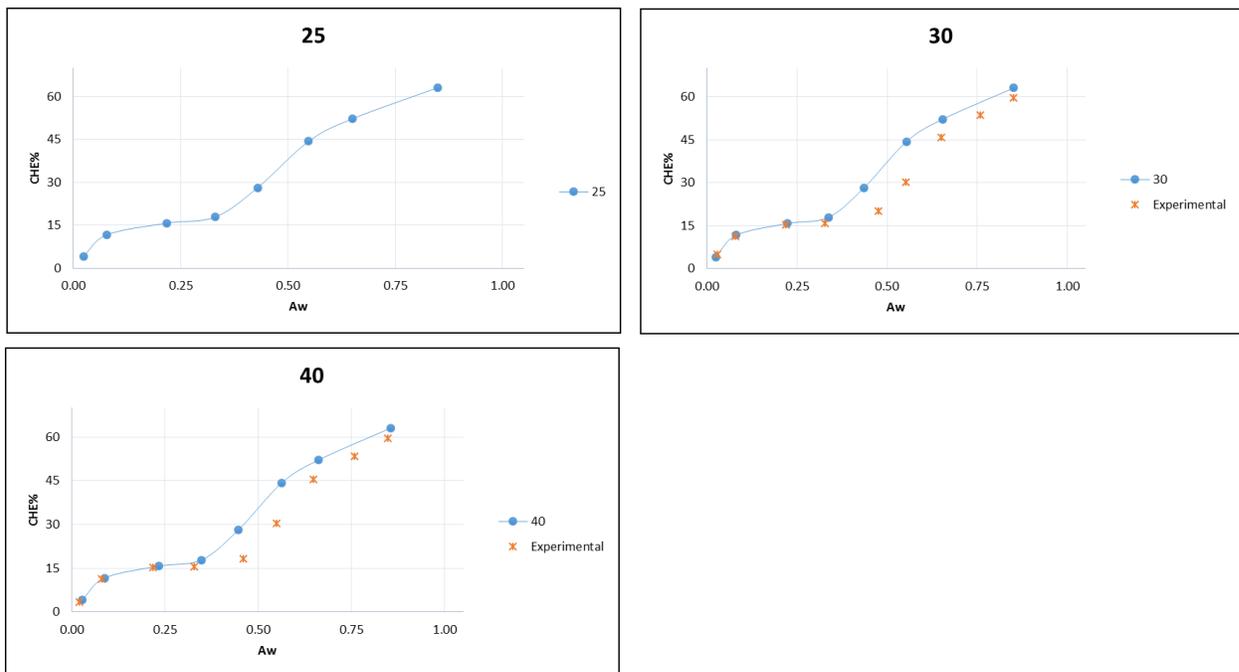


Figura 6.3 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, jitomate (Akanbi et al. [17]).

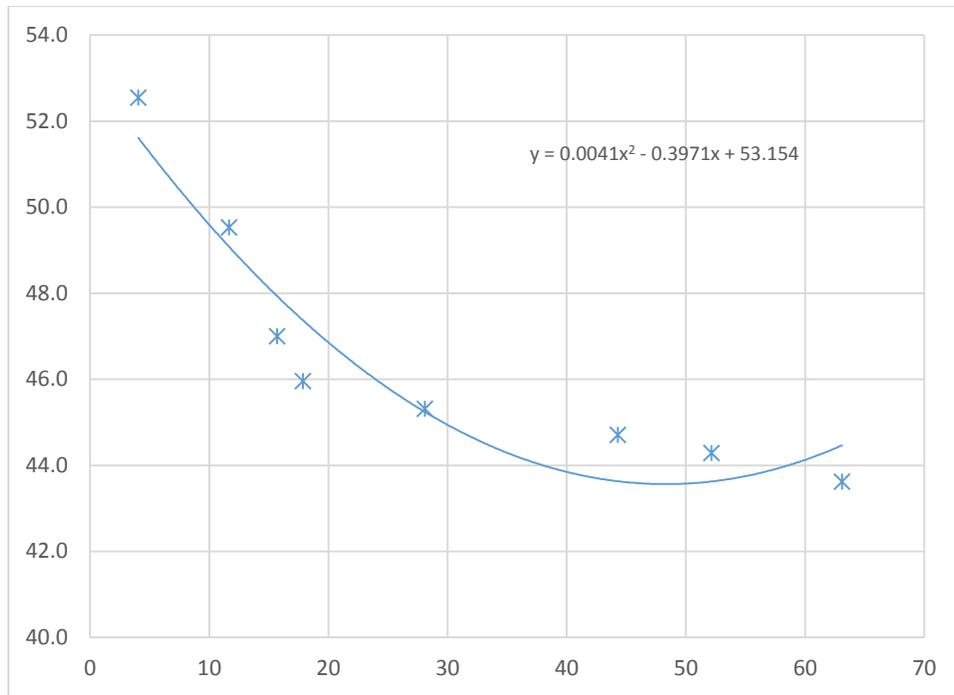


Figura 6.4 Curva de calor isostérico jitomate (Akanbi et al. [17]) calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.3 Papa (*Solanum tuberosum*) de Kaymak

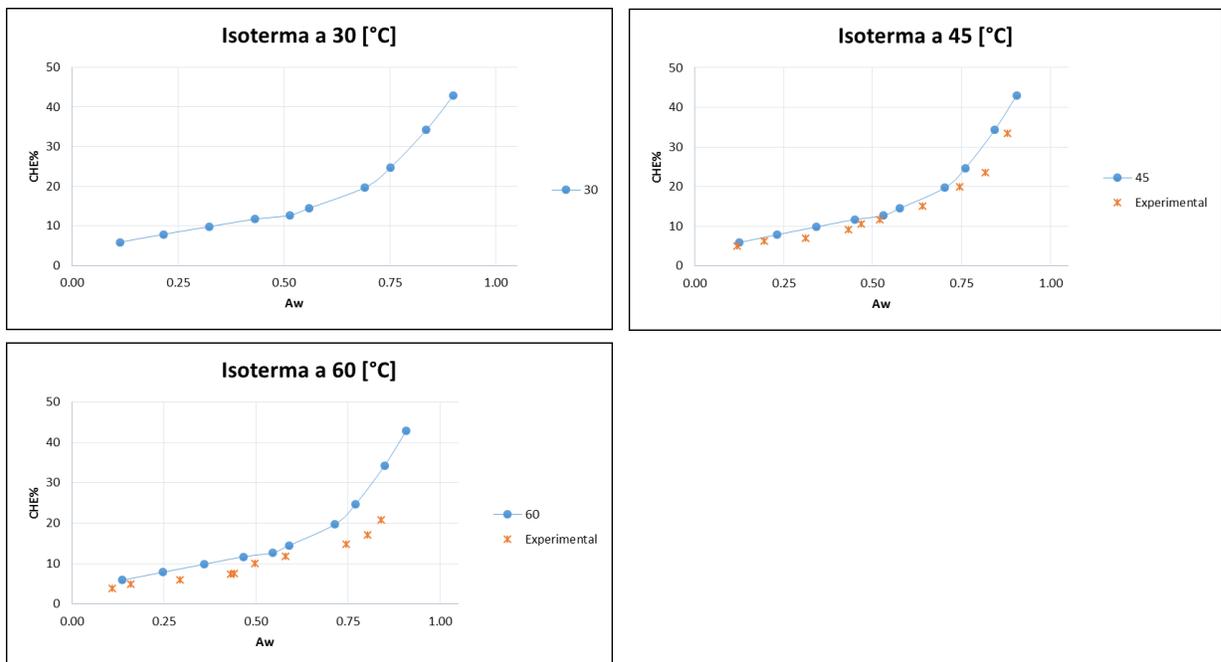


Figura 6.5 Isotermas de desorción calculadas con Método Polanyi, papa (Kaymak).

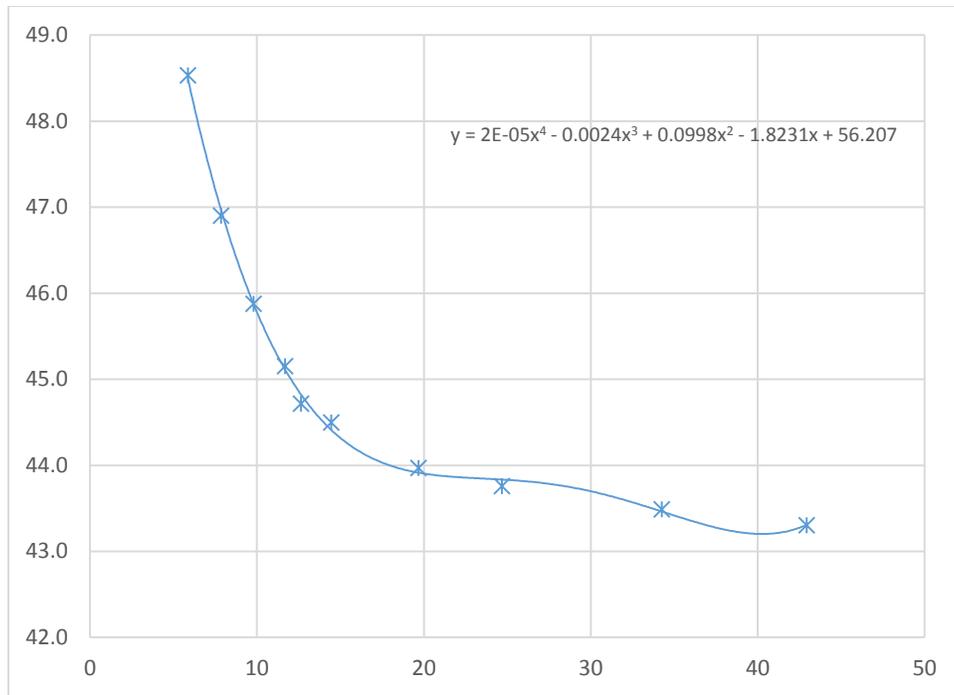


Figura 6.6 Curva de calor isostérico papa (Kaymak) calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.4 Papa (*Solanum tuberosum*) de Kiranoudis

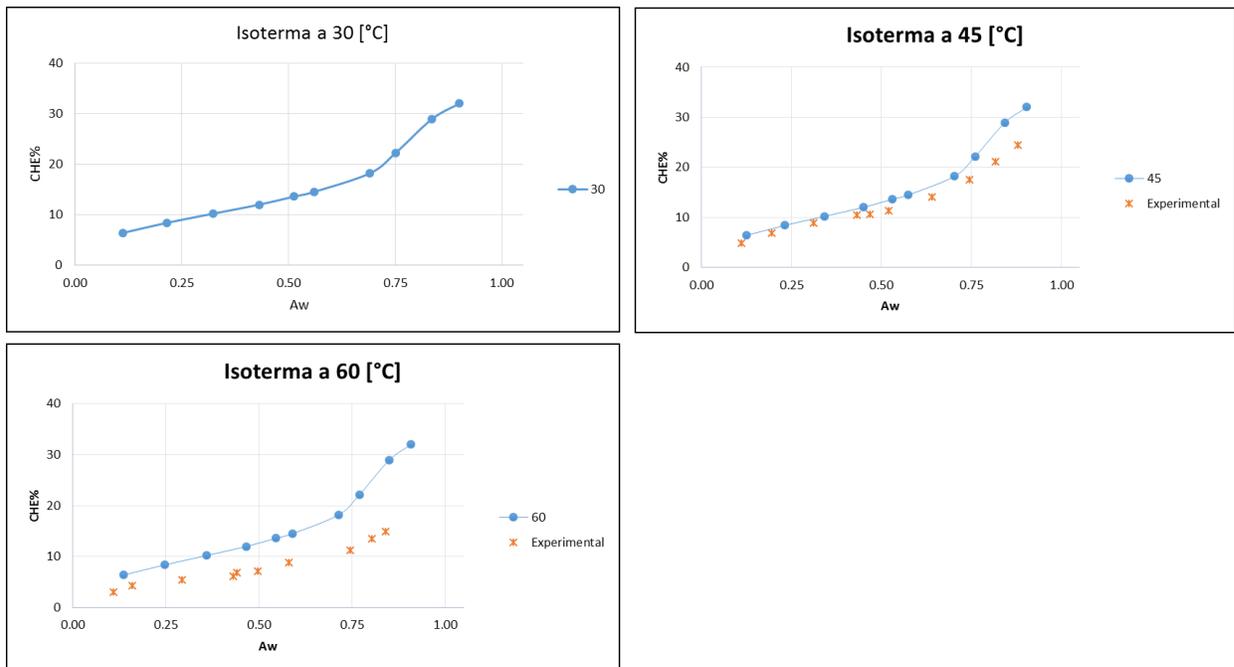


Figura 6.7 Isothermas de desorción calculadas con Método Polanyi, papa (Kiranoudis)

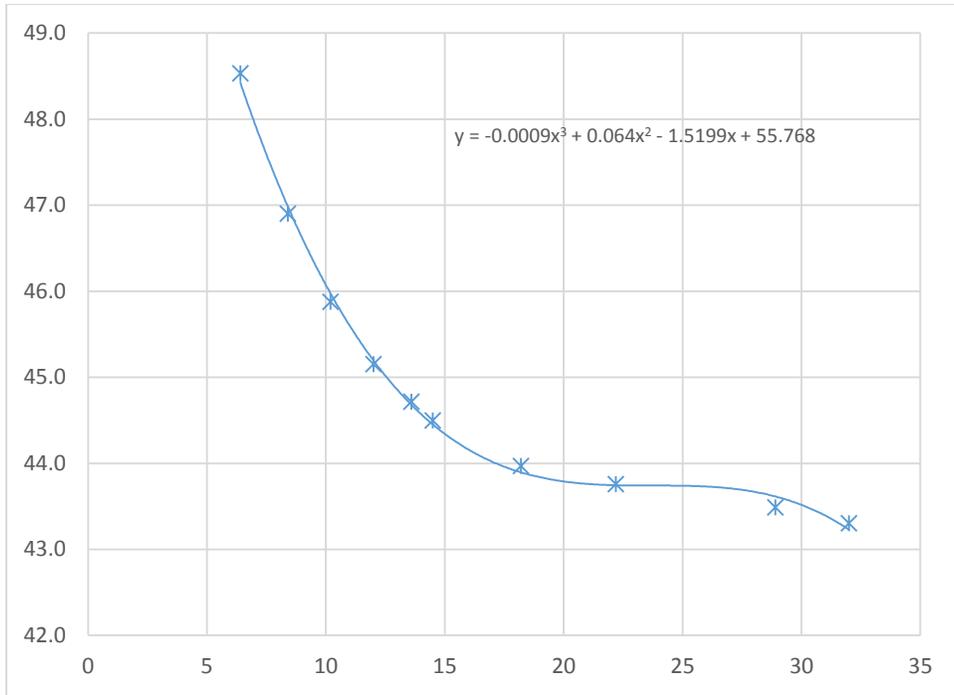


Figura 6.8 Curva de calor isostérico papa (Kiranoudis) calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.5 Papa (*Solanum tuberosum*) de McLaughlin

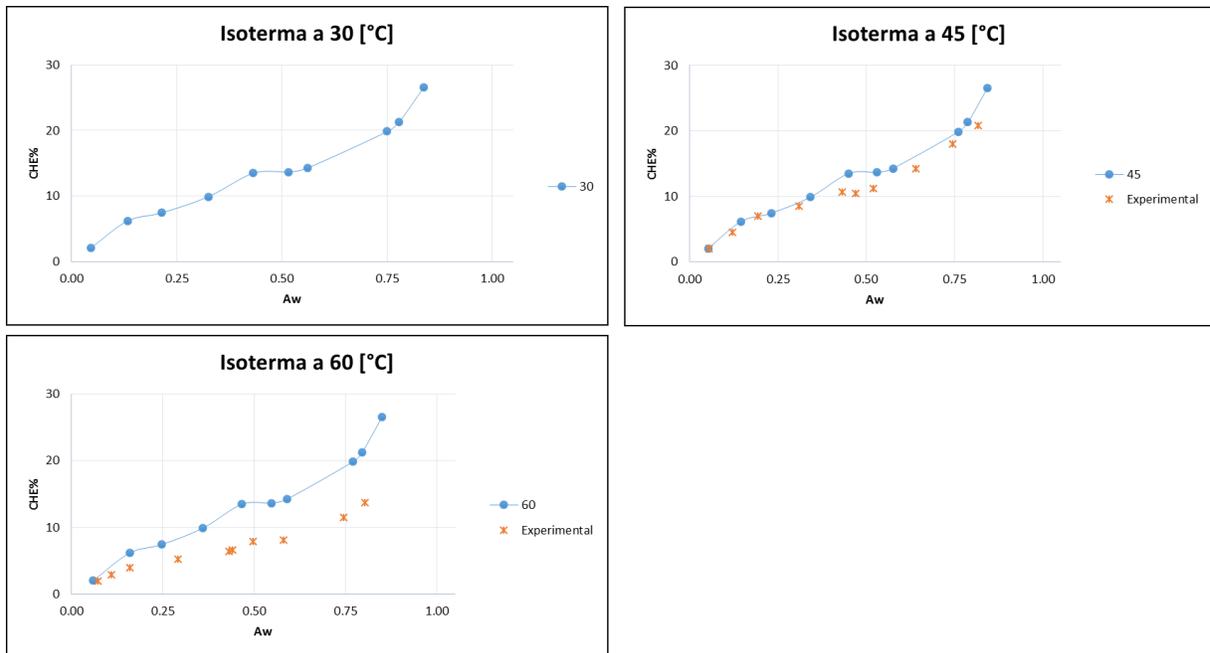


Figura 6.9 Isothermas de desorción calculadas con Método Polanyi, papa (McLaughlin)

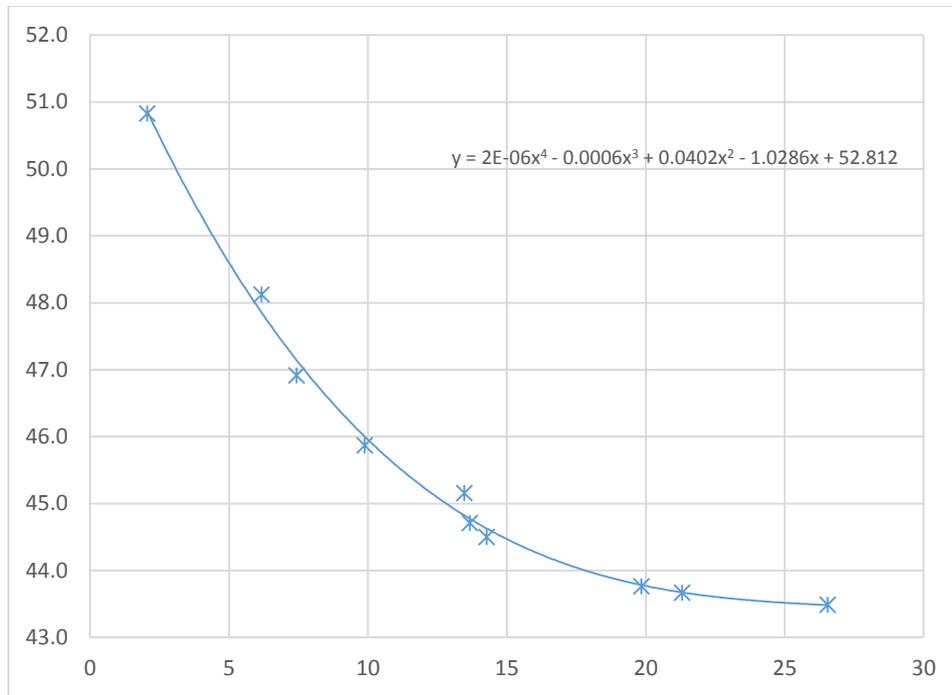


Figura 6.10 Curva de calor isostérico papa (McLaughlin) calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.6 Durazno (*Prunus persica*) de Tsami

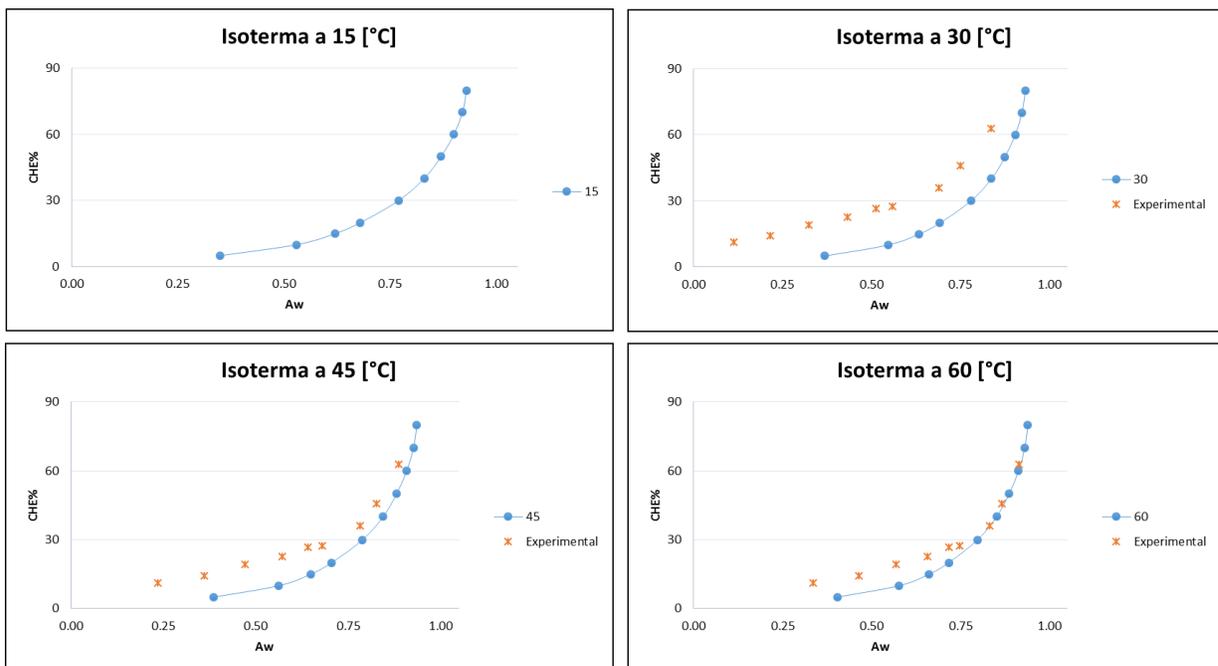


Figura 6.11 Isothermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, durazno (Tsami)

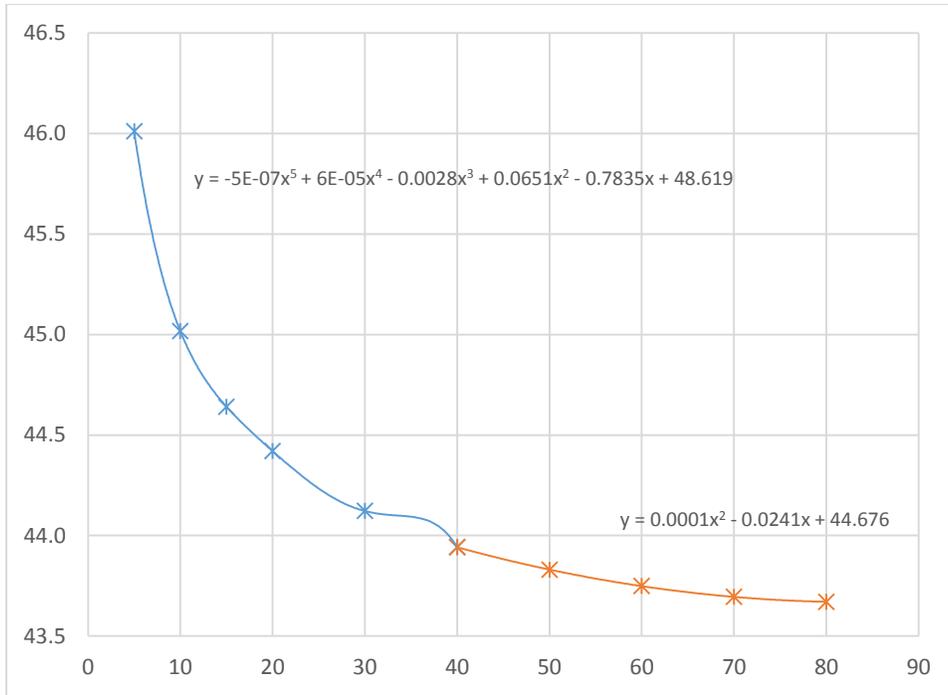


Figura 6.12 Curva de calor isostérico durazno (Tsami) calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.7 Durazno (*Prunus persica*) de Kaymak

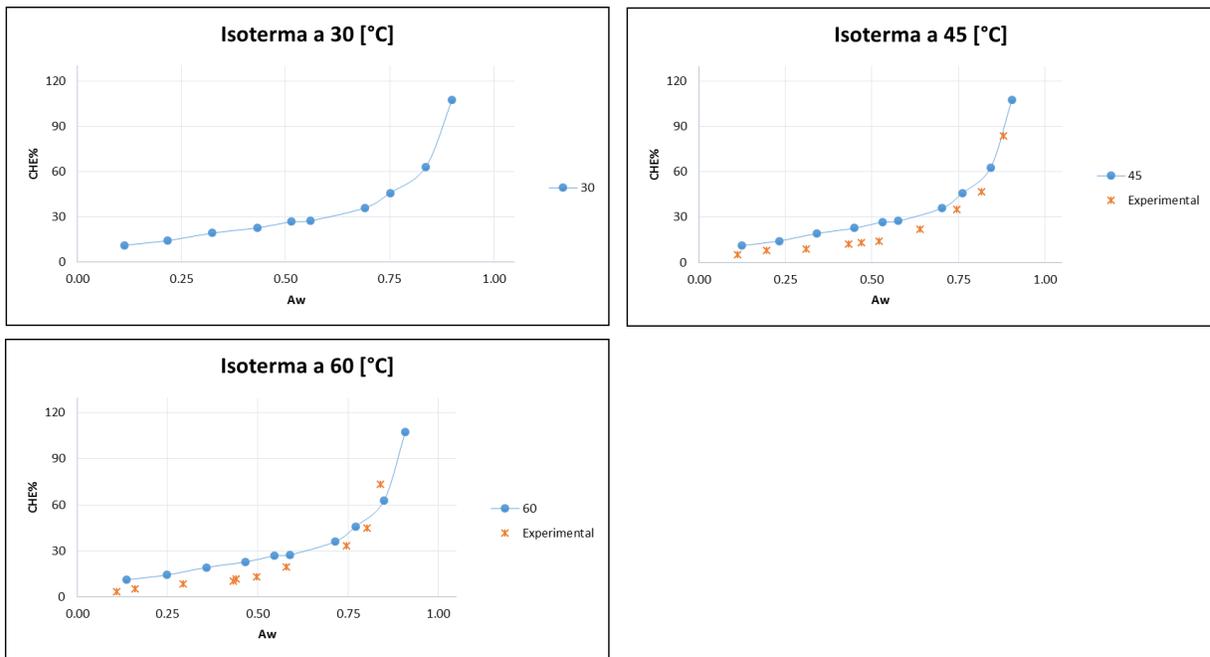


Figura 6.13 Isothermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, durazno (Kaymak)

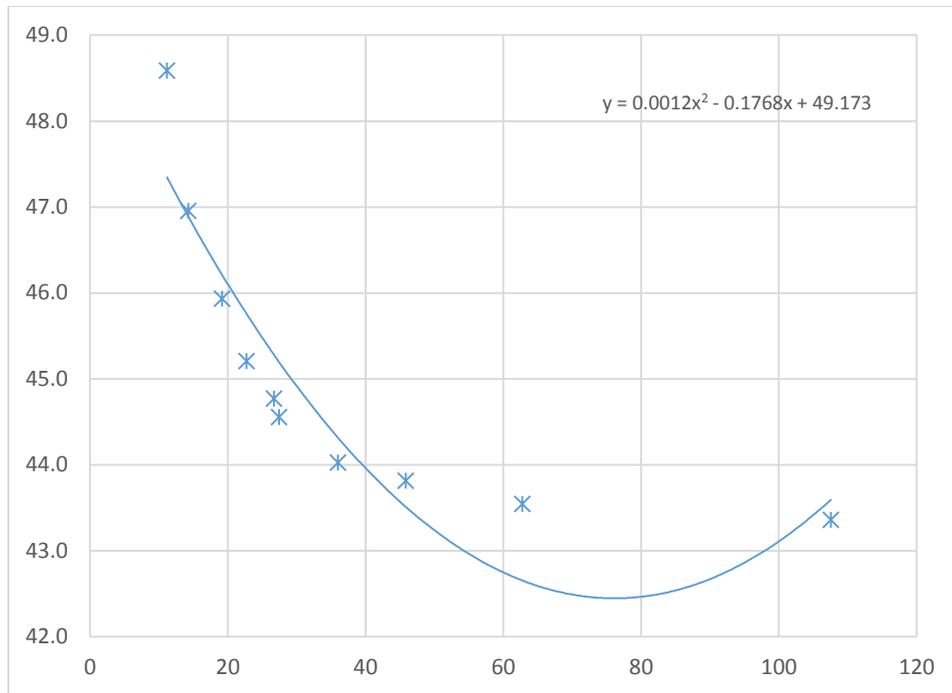


Figura 6.14 Curva de calor isostérico durazno (Kaymak) calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.8 Zanahoria (*Daucus carota*)

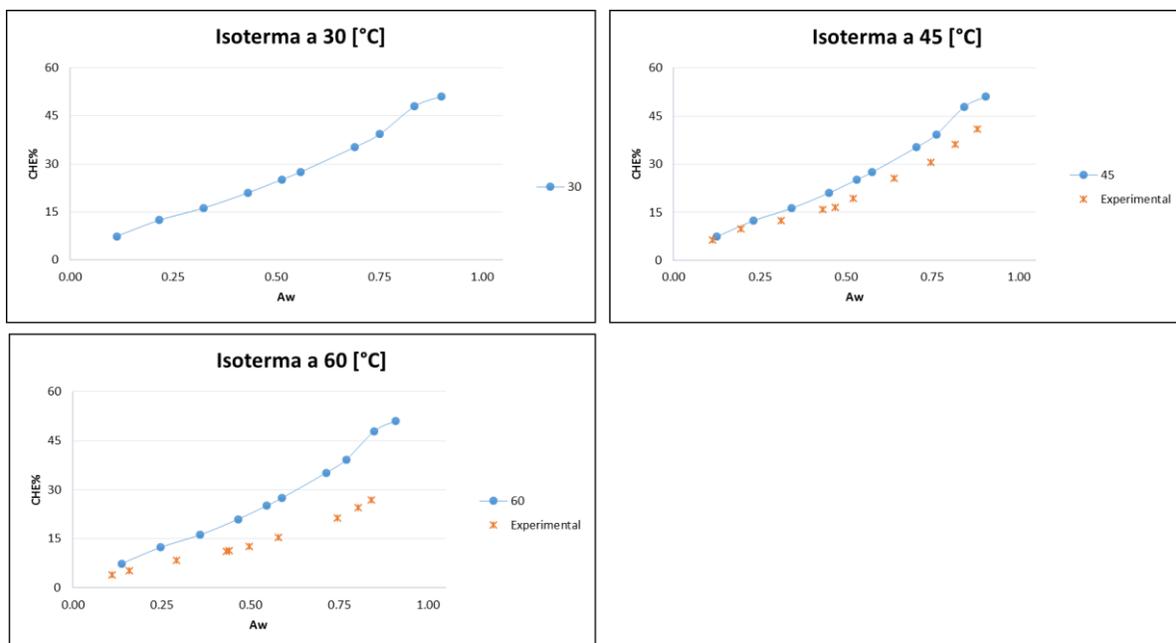


Figura 6.15 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, zanahoria.

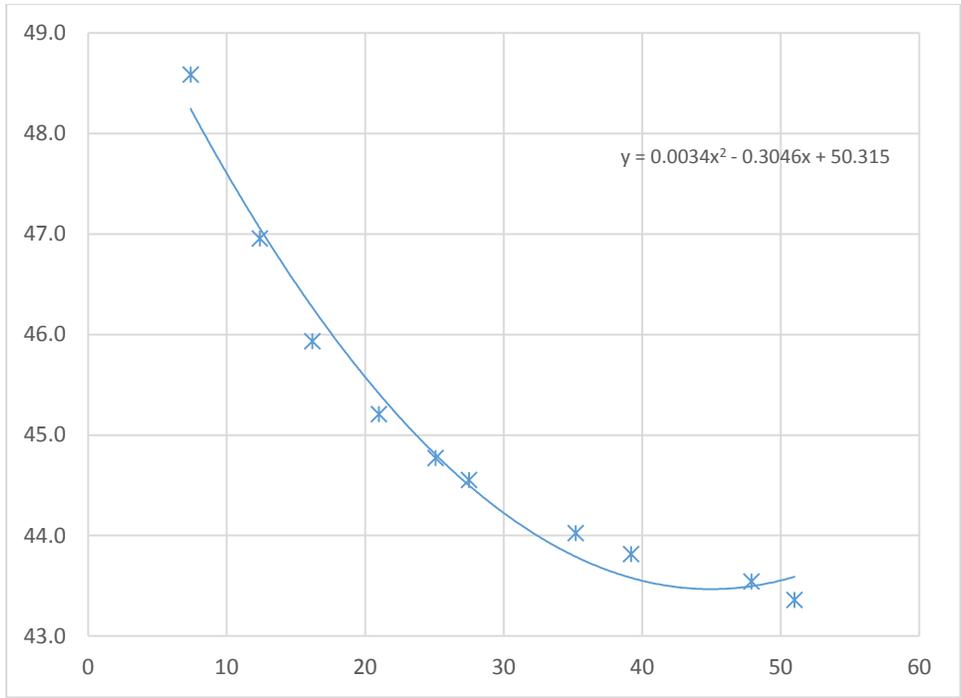


Figura 6.16 Curva de calor isostérico zanahoria calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.9 Cebolla (*Allium cepa*)

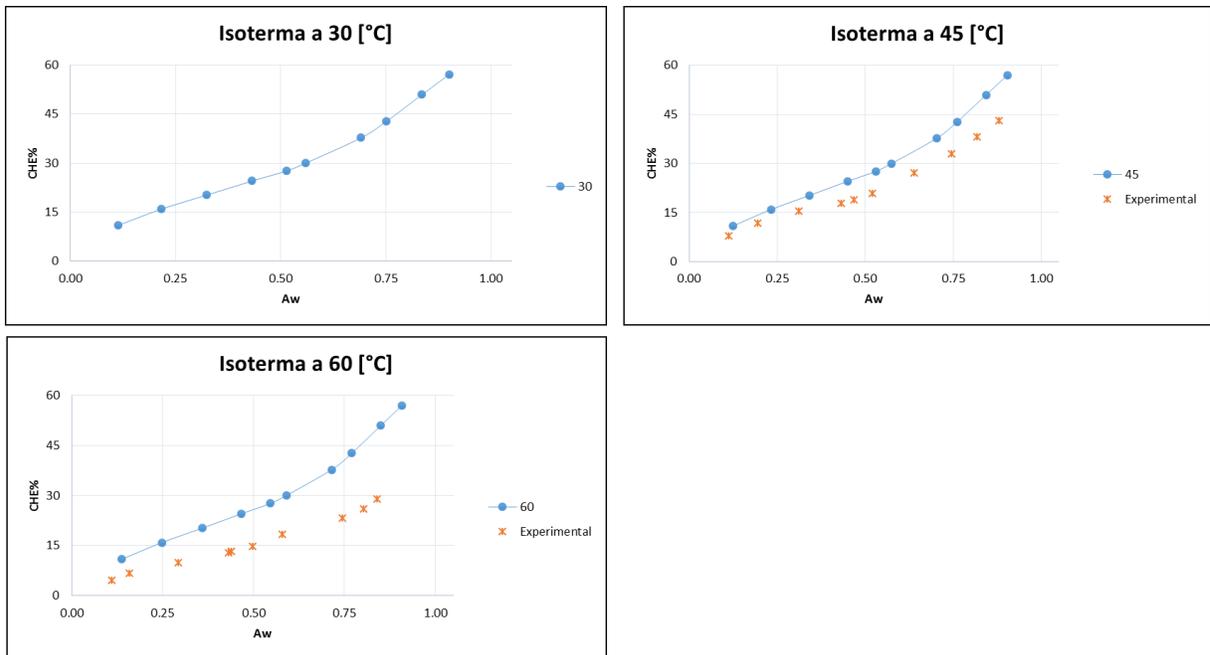


Figura 6.17 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, cebolla.

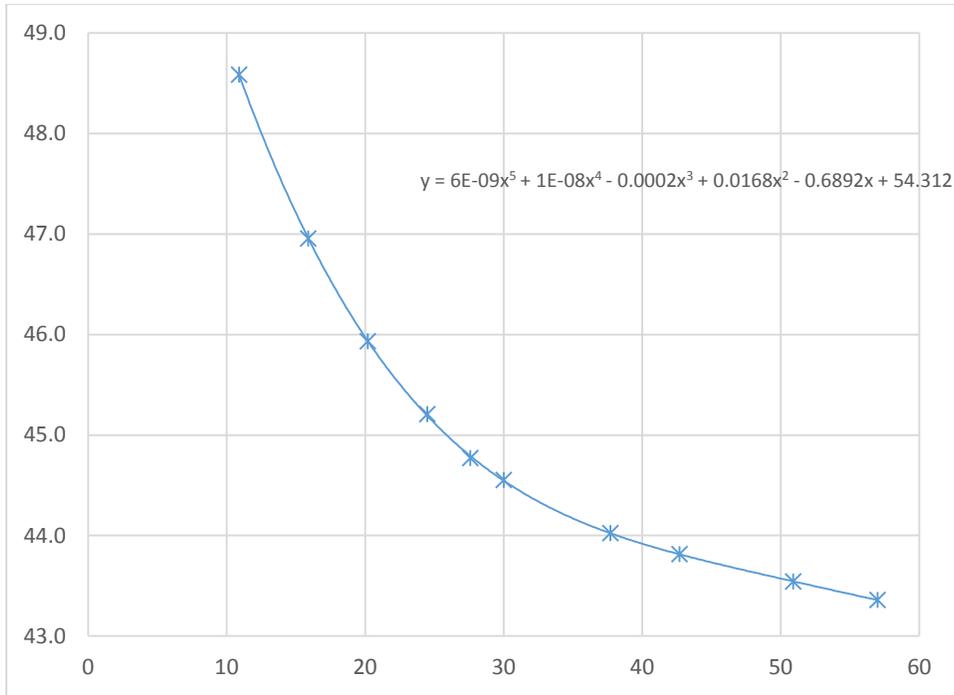


Figura 6.18 Curva de calor isostérico cebolla calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.10 Manzana (*Malus domestica*)

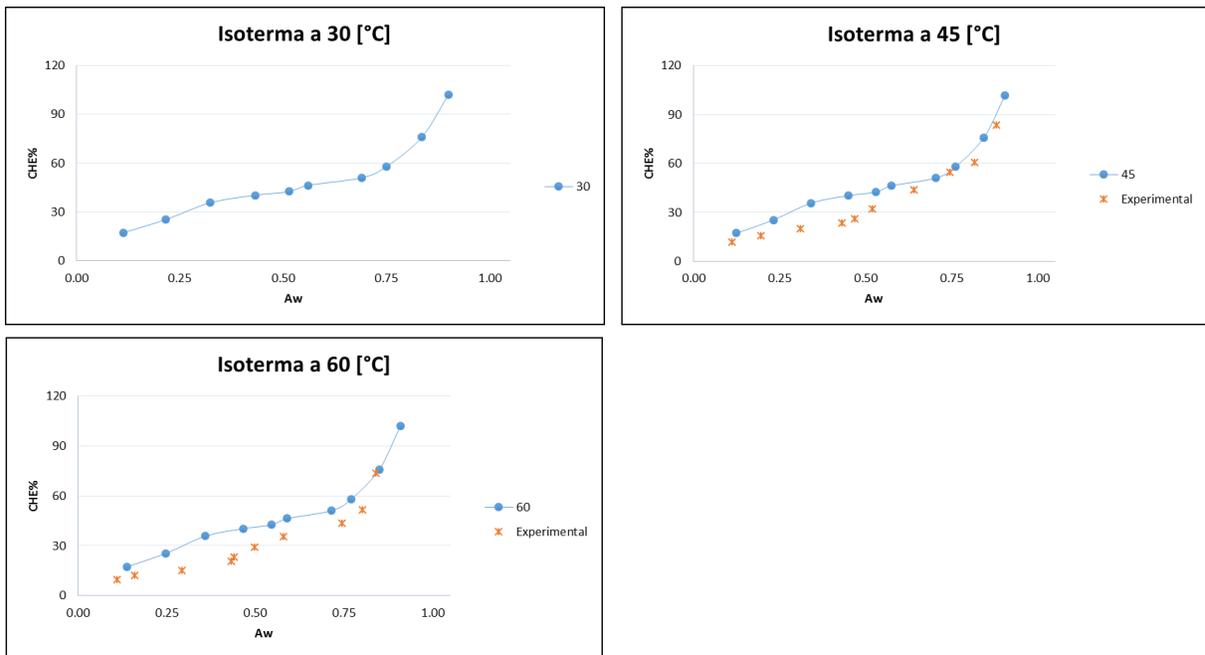


Figura 6.19 Isotermas de desorción calculadas con Método de Polanyi, manzana.

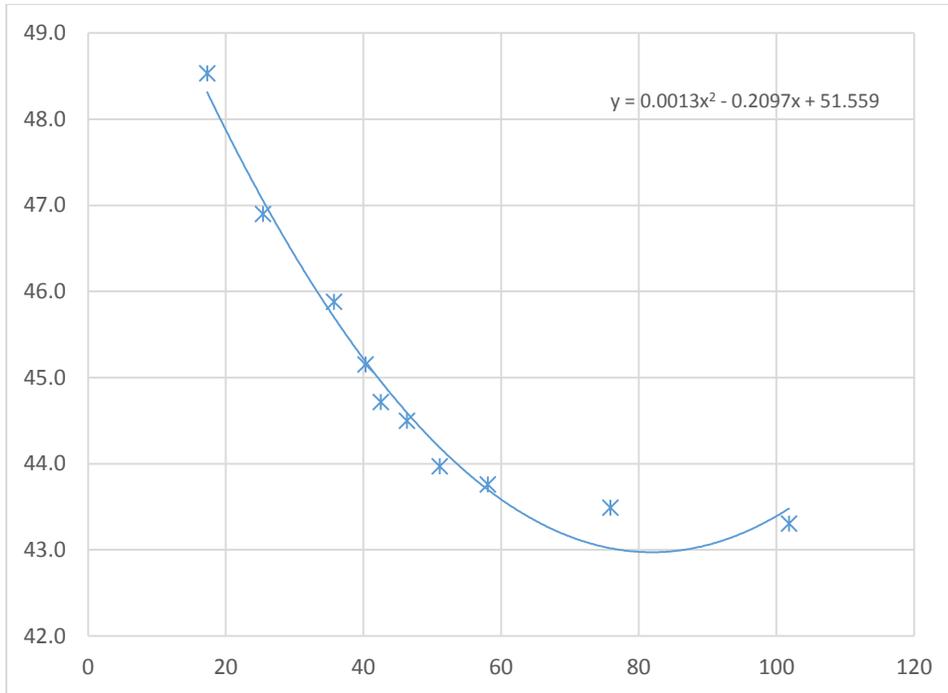


Figura 6.20 Curva de calor isostérico manzana calculado con la ecuación de Clausius-Clapeyron.

6.11 Análisis y validación del trabajo de Correa et al.

Con la intención de garantizar la adecuada ejecución del método propuesto por Correa et al. [18, 60] se calcularon las isotermas de sorción de algunos alimentos que reporta en sus artículos. En la siguiente tabla se reportan los resultados obtenidos; de los cuales puede apreciarse que el Método de Polanyi se ajusta muy bien a dichos productos alimenticios.

Tabla 6.1 Validación de los resultados obtenidos por Correa et al. [18, 60].

Food	Sorption properties		CALCULADOS		Cortes et al. [18, 60]
			EMR%	RMS%	RMS%
BICEPS FEMORIS MUSCLE OF PORK	Calor Isostérico [kJ/kg]			1.89	2.04
	Isoterma [°C]	25	0	0	0
		30	1.44%	2.01%	2.16%
		35	1.34%	2.12%	3.53%
		40	2.03%	3.17%	5.62%
SMIMBRANOUSUS MUSCLE OF PORK	Calor Isostérico [kJ/kg]			1.89	2.04
	Isoterma [°C]				
		25	0	0	0
		30	1.02%	1.14%	1.02%
		35	2.34%	2.78%	2.98%
GOAT MEAT	Calor Isostérico [kJ/kg]			2.02	2.29
	Isoterma [°C]				
		10	0	0	0
		25	4.64%	7.88%	3.68%
		50	6.42%	10.52%	5.20%
MOREL	Calor Isostérico [kJ/kg]			1.79	1.80
	Isoterma [°C]	5	0	0	0
		15	1.88%	2.86%	3.13%
		25	2.99%	4.59%	4.48%
		35	3.75%	5.92%	0.94%
LEMON JUICE	Calor Isostérico [kJ/kg]			2.20	---
	Isoterma [°C]	20	0	0	0
		30	3.83%	4.76%	0.00%
		40	8.17%	12.65%	0.17%
		50	7.76%	11.27%	0.38%
ACID CASEIN FROM BUFFALO SKIM MILK	Calor Isostérico [kJ/kg]			2.24	---
	Isoterma [°C]	25	0	0	0
		35	9.47%	11.40%	1.91%
		45	7.70%	9.62%	0.29%
YOGURTH	Calor Isostérico [kJ/kg]			2.02	---
	Isoterma [°C]	10	0	0	0
		25	9.77%	10.35%	0.10%
		40	20.14%	24.95%	0.59%

6.12 Caso de estudio

Como caso de estudio a los resultados obtenidos en la sección 4.2, el caudal del aire que demanda el proceso en función de la ubicación del equipo quedaría satisfecho por los siguientes equipos comerciales, en la siguiente tabla se reportan cada uno con sus respectivas características.

Tabla 6.2 Característica de diferentes sopladores comerciales

Sopladores comerciales	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	OPCIÓN 5
Voltaje [V]	115	115	115	230	115
Max Volumen de aire [ft³/min]	634	447	375	345	180
Max Volumen de aire [kg/s]	3.5	2.4	2.0	1.9	1.0
Amperes	6	4.5	2.3	1.3	2
Max Presión Estática [Bar]	0.25	0.23	0.09	0.09	0.17
Peso Neto/Bruto [kg]	8.16	5.9	2.02	2.02	3.63
Velocidad (RPM)	3200	3200	3400	2850	3200
Motor [HP]	1	1/2	1/4	1/4	1/4

La máxima cantidad de energía necesaria a suministrar al alimento es 24.1 [kW/h], para la piña; si se maneja un flujo másico de 1.1 [kg/s] la energía térmica alcanzada en el deshidratador en función de las temperaturas ambiente promedio de las localidades son las de la *Tabla 6.3*, esto para calentar el aire hasta la temperatura de operación 60 [°C]. Como se aprecia, la energía que se debe suministrar si el deshidratador se ubicará en Cerro Prieto es menor que la que se requiere en la localidad de Chignahuapan; esto se debe a las temperaturas ambiente en Cerro Prieto donde la temperatura ambiente promedio es de 41 [°C], mientras que para Chignahuapan es de 30 [°C]. Esto se debe a la relación entre el flujo másico de aire y el diferencial de temperatura T_0 y T_a , los cuales son inversamente proporcionales, *Ecuación 49*.

Para el flujo de 1.9 [kg/s] la carga térmica alcanzada por localidad queda de la siguiente manera:

Tabla 6.3 Carga térmica calculada para las diferentes localidades, alcanzada con el flujo másico de aire que maneja el equipo, OPCIÓN 5

Localidades	Flujo aire
	1.1 [kg/s]
Ensenada, B.C.	22 [kW]
Cerro Prieto, B.C.	16 [kW]
Chignahuapan, Pue.	28 [kW]
Compostela, Nay.	21 [kW]
Creel, Chih.	26 [kW]

Recordando que la energía mínima necesaria para la piña, es de 24.1 [kW/h], con este flujo másico garantizamos que dicha energía estará cubierta.

7 REFERENCIAS

- [1] International Nut&DriedFruit, «INC international Nut&DriedFruit.» International Nut and Dried Fruit Council, [En línea]. Available: <http://www.nutfruit.org/>. [Último acceso: 7 10 2016].
- [2] FAO, «Food and Agriculture Organization of the United Nations.» FAO, 2016. [En línea]. Available: http://faostat.fao.org/beta/en/#rankings/commodities_by_country. [Último acceso: 14 11 2016].
- [3] F. B. C. Correa, Adsorción en agua en materiales compuestos y en zeolita, Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [4] H. Aviña-Jiménez, E. Pérez-González and P. Seve, "Low-enthalpy geothermal food dehydrator," *Geothermal Energy Here and Now: Sustainable, Clean, Flexible*, vol. 40, pp. 163-168, 2016.
- [5] J. W.-Lund y T. L.-Body, «Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review.» Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 2015.
- [6] R. B. Bird, W. E. Stewart y E. N. Lightfoot, Fenómenos de transporte, México: Limusa, 2006.
- [7] A. Dabrowski, «Adsorption-from theory to practice.» *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 93, pp. 135-224, 2001.
- [8] F. B. C. Correa, «Informe Curso Isoformas Secado UNAM,» de *Curso Taller de Secado Solar*, Temixco, Morelos, 2013.
- [9] Universidad Jaume I. de Castellón, «<http://www.agua.uji.es/>» [En línea]. Available: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>. [Último acceso: 06 abril 2016].
- [10] F. Rouquerol, J. Rouquerol y K. Sing, «Thermodynamics of Adsorption at the Gas-Solid Interface,» de *Adsorption by Powders and Porous Solids*, Marseille, Francia, Elsevier, 1999, pp. 27-50.
- [11] S. B. Dergal, Química de los Alimentos, México: Pearson Educación, 2006.
- [12] M. Mathlouthi y B. Rogé, «Water vapor sorption isotherms and the caking of food powders.» *Food Chemistry*, vol. 82, pp. 61-71, 2003.
- [13] J. V. Trejo, *Adsorción de agua en alimentos. Isoterma de adsorción de Guggenheim, Andreson y de Boer (GAB)*, UNAM, Ed., México, Ciudad Universitaria.
- [14] A. A. Aponte, «Estimación de las Isoformas de Adsorción y del Calor Isostérico en Harina de Yuca.» *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 9, n° 1, pp. 88-96, 2011.
- [15] C. J. Geankoplis, Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, México: COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998.
- [16] M. Chaves, S. Sgroppo y J. R. Avanza, *Cinética de secado de berenjenas (Solanum melongena L.)*, Corrientes: Universidad Nacional del Nordeste, 2003.
- [17] C. T. Akanbi, R. S. Adyemi y A. Ojo, «Drying Characteristics and sorption isotherm of tomato slices.» *Journal of Food Engineering*, vol. 73, pp. 157-163, 2006.
- [18] F. B. C. Correa, F. Chejne y B. Rojano, «A New Model for Predicting Sorption Isotherm of Water in Foods.» *International Journal of Food Engineering*, vol. 7, n° 16, 2011.
- [19] B. Zanon, G. Giovanelli, V. Lavelli y R. Nani, «Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products.» *Journal of Food Engineering*, vol. 52, pp. 135-141, 2002.
- [20] J. Rubio, M. A. Rodríguez, J. Díez y J. Oteo, *Determinación de calores isostéricos de adsorción de vidrios silicoboricos(i)*, Madrid: Artículo Científico, 1986.
- [21] T. Chafik, «Determination of Adsorption Characteristics of Volatile Organic Compounds Using Gas Phase FTIR Spectroscopy Flow Analysis,» de *Infrared Spectroscopy- Materials Science, Engineering and Technology*, Croacia, INTECH, 2012, pp. 421-432.
- [22] N. Wang y J. Brennan, «Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Potatoes at Four Temperatures.» *Journal of Food Engineering*, vol. 14, pp. 269-287, 1991.
- [23] E. Tsami, «Net Isotherm of Sorption in Dried Fruits.» *Journal of Food Engineering*, vol. 14, pp. 327-335, 1991.
- [24] F. Kaymak-Ertekin y A. Gedik, «Sorption Isotherms and Isotherm Heat of Sorption for Grapes, Apricots, Apples and Potatoes.» *Lebns.-Wiss. u.-Technol; Elsevier*, vol. 37, pp. 429-438, 2004.
- [25] M. Hossain, B. Bala, M. Hossain y M. Mondol, «Sorption Isotherms and Heat of Sorption of Pineapple.» *Journal of Food Engineering*, vol. 48, pp. 103-107, 2001.
- [26] M. Caurie, «Misapplication of the Clausius-Clapeyron equation for estimating heats of adsorption in foods.» *International journal of food science & technology*, vol. 48, pp. 596-600, 2013.
- [27] A. Mulet, J. García-Reverter, R. Sanjuán y J. Bon, «Sorption isotherm heat determination by thermal analysis and sorption isotherms.» *Journal of food science*, vol. 64, n° 1, pp. 64-68, 1999.
- [28] D. L. M. Lagunas, «Actividad de Agua,» de *Curso Taller de Secado Solar*, Temixco, Morelos, 2013.
- [29] G. J. Tortora, B. R. Funke y C. L. Case, Introducción a la Microbiología, México D.F.: 9a Edición, 2007.
- [30] M. J. Á.-M. J. B. J. C. Jordi Vila, «Diagnóstico microbiológico de las infecciones gastrointestinales.» *Elsevier*, pp. 406-411, 2009.
- [31] J. M. Motezuma, *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-112-SSA1-1994*, México, Distrito Federal, 1995.
- [32] J.-Y. Lee y D.-H. Kang, «Development of an improved selective medium for the detection of Shigella spp.» *Elsevier*, pp. 311-317, 2016.
- [33] C. Ma y Q. Z. Jianguo Li, «Behavior of Salmonella spp. on fresh-cut tropical fruits.» *Elsevier*, pp. 133-141, 2016.
- [34] Á. E. C. Torres, Temas de Higiene de los Alimentos, La Habana Cuba: Ciencias Médicas, 2008.
- [35] E. G. Vázquez, «Falsa apendicitis yersinia enterocolítica.» *Revista Digital Universitaria*, p. 3, 2005.
- [36] E. Ochoa-Reyes, J. d. J. Ornelas-Paz, S. Ruiz-Cruz, V. Ibarra-Junquera, Jaime D. Pérez-Martínez, J. C. Guevara-Araza y C. N. Aguilar, «Tecnologías de deshidratación para la preservación de tomate (Lycopersicon esculentum Mill.).» *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, vol. 15, n° 2, pp. 39-46, 2013.
- [37] J. Khazaei, G.-R. Chegini y M. Bakhshiani, «A Novel Alternative Method for Modeling the Effects of Air Temperature and Slice Thickness on Quality and Drying Kinetics of Tomato Slices: Superposition Technique.» *Drying Technology: An International Journal*, 2008.
- [38] B. Zanon, C. Peri, R. Nani y V. Lavelli, «Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying.» *Elsevier Science*, vol. 31, n° 5, pp. 395-401, 1999.
- [39] C. Delgado-Andrade, I. Seiquer, M. P. Navarro y F. J. Morales, «Estimation of hydroxymethylfurfural availability in breakfast cereals. Studies in Caco-2 cells.» *Food and Chemical Toxicology*, vol. 46, pp. 1600-1607, 2008.
- [40] J. Shi, M. L. Maguer, Y. Kakuda, A. Liptay y F. Niekamp, «Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration.» *Food Research International*, vol. 32, pp. 15-21, 1999.
- [41] M. Arici, R. M. Yildirim, G. Özülkü, B. Yasar y O. S. Tokar, «Physicochemical and nutritional properties of taro (Colocasia esculenta L. Schott) flour as affected by drying temperature and air velocity.» *LWT - Food Science and Technology*, vol. 74, pp. 434-440, 2016.
- [42] S. Landon, C. Colyer y H. Salman, «The Resistant Starch Report.» 2012.
- [43] T. Tribess, J. Hernández-Urbe, M. Méndez-Montealvo, E. Menezes, L. Bello-Pérez y C. Tadini, «Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (Musa cavendishii) produced at different drying conditions.» *LWT - Food Science and Technology*, vol. 42, pp. 1022-1025, 2009.
- [44] R. J. Vera, N. G. Cortés, A. M. Contreras y A. I. C. Cruz, «Contenido de almidón resistente en alimentos consumidos en el sureste de México.» *UNACARTECNOLOGIA*, pp. 27-34, 2011.

- [45] B. Zani, E. Pagliarini y R. Foschino, «Study of the stability of dried tomato halves during shelf-life to minimise oxidative damage.», *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 80, pp. 2203-2208, 2000.
- [46] A. Serdar y B. Ayse-Vildan, «Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity.», *Food Chemistry*, vol. 210, pp. 577-584, 2016.
- [47] S. J. Babalis y V. G. Belessiotis, «Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs.», *Journal of Food Engineering*, vol. 65, pp. 449-458, 2004.
- [48] E. Horuz y M. Maskan, «Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils.», *J. Food Sci Technol*, vol. 52, pp. 285-293, 2015.
- [49] Y. Carmona-López, Caracterización fisicoquímica, microbiológica y sensorial de frutas deshidratadas mediante energía geotérmica., Ciudad de México: UNAM, 2016.
- [50] S. Abbasi, S. Mousavi y M. Mohebbi, «Investigation of Changes in Physical Properties and Microstructure and Mathematical Modeling of Shrinkage of Onion during Hot Air Drying.», *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, vol. 7, n° 1, pp. 92-98, 2011.
- [51] C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis, E. Tsami y D. Marinos-Kouris, «Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetables.», *Journal of Food Engineering*, vol. 20, pp. 55-74, 1993.
- [52] C. McLaughlin y T. R. A. Magee, «The Determination of Sorption Isotherm and the Isosteric Heats of Sorption for Potatoes.», *Journal of Food Engineering*, vol. 35, pp. 267-280, 1998.
- [53] R. H. Perry, D. W. Green y J. O. Maloney, Perry Manual del Ingeniero Químico, México: McGraw-Hill, Sexta edición/ Tercera edición en español.
- [54] E.-J. Quirijns, A.-J. v. Boxtel, W.-K. v. Loon y G. v. Straten, «Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption.», *Journal of the science of food and agriculture*, vol. 85, pp. 1805-1814, 2005.
- [55] R. Moreira, F. Chenlo, M. Torres y N. Vallejo, «Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits.», *Jornal of food engineering*, vol. 88, pp. 514-521, 2008.
- [56] K. Mitsui, F. David, E. Dumont, N. Ochiai, H. Tamura y P. Sandra, «LC fraction followed by pyrolysis GC-MS for the in-depth study of aroma compounds formed during tobacco combustion.», *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 116, pp. 68-74, 2015.
- [57] O. T. Chortyk y W. S. Schlotzhauer, «Studies on the Pyrogenesis of Tobacco Smoke Constituents (A Review).», *Beitrag zur Tabakforschung*, vol. 7, n° 3, pp. 165-178, 1973.
- [58] Subovsky, M. J.-S. López, Angela-Castillo, Alicia-Cano y Nelly, «Evaluación del contenido de hidroximetilfurfural en mieles de oca (*Oxalis tuberosa*).» Facultad de Ciencias Agrarias-Química Orgánica y Biológica, Corrientes, Argentina, 2004.
- [59] L. F. Soto-Moreno, Selección y optimización de un método de secado para incrementar la concentración de azúcares en oca (*Oxalis tuberosa*). Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2000.
- [60] F. B. C. Correa y F. Chejne, «A rapid and novel approach for predicting water sorption isotherms and isosteric heats of different meat types.», *Meat Science*, vol. 86, pp. 921-925, 2010.
- [61] S. B. Dergal, La ciencia de los alimentos en la práctica, México, D.F.: Pearson, 2012.
- [62] G. T. M. M. A. Bejan, Thermal Design and optimization, John Wiley & Sons, 1996.
- [63] C. y. B. D. Aguilar, «Journal of Agricultural Engineering Research.», de *Temperature ratios for measuring efficiency and for the control of dryers.*, 1966, pp. 19-23.
- [64] U. d. Amsterdam, «SlideShare.», 20 marzo 2009. [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/guested7523/crecimiento-microbiano>.
- [65] Y. A. Cengel y M. A. Boles, Termodinámica, México: McGrawHill, 2012.
- [66] Y. A. Cengel y A. J. Ghajar, Transferencia de Calor y Masa, México: McGrawHill, 2011.
- [67] R. K. S. a. D. P. Sekulic, Fundamentals of Heat Exchanger Design, John Wiley & Sons, 2003.
- [68] T. Vázquez, S. Améz, M. Fernández y J. d. D. Fernández, Manual del Secado Solar Técnico de Alimentos, Cochabamba: Energética, 1997.
- [69] F. P. García, A. J. G. Martínez, J. P. Méndez, C. A. G. Aldapa y A. D. R. Gutierrez, *Evaluación de las isotermas de sorción en cereales para desayuno*, vol. 19, Pachuca, Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2006, pp. 12-19.
- [70] A. S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [71] S. Velasco y C. F. Pineda, «Grupo de Investigación en Termodinámica y Física Estadística, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Salamanca.», [En línea]. Available: http://gtfe.usal.es/Esp/paginas_lineas_investigacion_publicaciones/Ensenanza_esp.htm. [Último acceso: 23 04 2016].
- [72] B. R. F. Design Analysis of Thermal Systems, John Wiley & Sons, 1987.
- [73] S. Ross, On physical adsorption, New York: Interscience Publishers, 1964, p. 78.
- [74] M. Almada, M. S. Cáceres, M. Machaín-Singer y J. C. Pulfer, *Guía de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes.*, Asunción, Paraguay: UNESCO, 2005.
- [75] H. A. Iglesias y J. Chirife, Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components, Buenos Aires, Argentina: Academic Press, 1982.
- [76] *CODEX NORMA PARA LA MIEL, STAN 12-1981. ALIMENTOS-MIEL-ESPECIFICACIONES Y METODOS DE PRUEBA*, SECRETARIA DE SALUD, 2000.
- [77] E. Pérez-González, Diseño de un sistema deshidratador de alimentos geotérmico de baja entalpía, Ciudad Universitaria, México: UNAM, 2014.
- [78] I. Doymaz, «Air-drying characteristics of tomatoes.», *Journal of Food Engineering*, vol. 78, pp. 1291-1297, 2007.
- [79] T. Theophile, Determination of Adsorption Characteristics of Volatile Organic Compounds Using Gas Phase FTIR Spectroscopy Flow Analysis, China: INTECH, 2012, pp. 421-432.
- [80] K. Di-Scala, A. Vega-Gálvez, M. Miranda, R. Clavería, I. Quispe, J. Vergara, E. Uribe y H. Paez, «Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*).», *LWT-Food Science and Technology*, vol. 44, pp. 16-23, 2011.
- [81] A.-K. Baloch, W.-A. Baloch y S. Khan, «Influence of chemical additives on the stability of dried tomato powder.», *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 32, pp. 117-120, 1997.
- [82] T. Kudra y A. S. Mujumdar, Advanced Drying Technologies, New York: Taylor and Francis Group, 2009.
- [83] M.-T. Madigan, J.-M. Martinko y J. Parker, Biología de los Microorganismo, Decima edición ed., México: Prentice Hall.
- [84] E. Ceballos-Ortiz y M. Jiménez-Munguía, «Cambios en las propiedades de frutas y verduras durante la deshidratación con aire caliente y su susceptibilidad al deterioro microbiano.», *Temas selectos de ingeniería de alimentos*, vol. 6, n° 1, pp. 98-110, 2012.
- [85] A. Mujumdar, S. Jangam y C. Law, Drying of Food, Vegetables and Fruits, Primera edición ed., vol. 1, Singapur, 2010.
- [86] T. Gaware, N. Sutar y B. Thorat, «Drying of Tomato Using Different Methods: Comparison of Dehydration and Rehydration Kinetics.», *Drying Technology*, vol. 28, pp. 651-658, 2010.
- [87] C. Notario-Medellín y M. Sosa-Morales, «El jitomate (*Solanum lycopersicum*): aporte nutricional, enfermedades postcosecha y tecnologías para su almacenamiento en fresco.», *Temas selectos de ingeniería de alimentos*, vol. 6, n° 1, pp. 40-53, 2012.
- [88] H.-A. V. Herrera, Contribución al Estudio y Optimización del Secado Intermitente: Aplicación al Secado de Mango (*Mangifera indica* L. var. Tommy Atkins), Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- [89] M. S. G. Gómez, Deshidratado de tomate saladette en un secador de charolas giratorias, Huajuapán de León, Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2009.