



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA - IZTAPALAPA  
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**EFFECTO DEL ENCOGIMIENTO DEL SÓLIDO  
EN LA HIDRODINÁMICA DE UN SECADOR  
DE LECHO FLUIDIZADO**

Tesis que presenta  
**I.Q. Angel Ruiz Sánchez**  
Para obtener el grado de  
**Maestro en ciencias (Ingeniería Química)**

**Asesores:**

Dr. Mario Gonzalo Vizcarra Mendoza  
Dr. Carlos Martínez Vera

**Jurado calificador:**

**Presidente:** Dr. Richard Steve Ruiz Martínez  
**Secretario:** Dr. Mario Gonzalo Vizcarra Mendoza  
**Vocal:** Dr. Francisco Vidal Caballero Dominguéz

México, D.F. Octubre 2014.

## **DEDICATORIAS**

A mis padres, María Magdalena Ruiz Sánchez y Juan Méndez García (†), por darme la vida, cariño y amor. Siempre han sido y seguirán siendo mi motivación para seguir adelante y ser una persona de bien. Gracias a ustedes soy una persona responsable, trabajadora y con muchos deseos de superación, pues me enseñaron que la iniciativa, dedicación y la perseverancia son los medios más importantes para lograr los objetivos que me proponga.

A mi familia por su apoyo incondicional y por la confianza absoluta durante el posgrado, por ser la motivación más grande para el desarrollo y terminación de este trabajo. Nunca olvidaré el día en que tomé la decisión de continuar con mi preparación académica y les comenté que tenía que irme a la ciudad de México, sería deshonesto de mi parte decir que la decisión fue sencilla y que en los primeros días no sentí tristeza alguna. Es evidente que la distancia me hizo extrañarlos, pero gracias a su apoyo y cariño puedo comentarles que la tristeza se marchó en el primer mes del posgrado, pues de ahí en adelante me sentí como en casa.

Al I.B.I Marcos García Sibaja, porque más allá de ser mi profesor de Química en la preparatoria, fue él quien me impulsó a prepararme académicamente en una de las áreas que orgullosamente puedo decir que es la mejor, la ingeniería química. No olvidaré sus consejos, apoyo y confianza depositada en mí persona durante los estudios de posgrado.

A la Universidad del Istmo Campus Tehuantepec y a cada uno de sus catedráticos que me impartieron materias de la carrera de ingeniería Química. Es un hecho que mi preparación académica en sus aulas fue una herramienta indispensable para desarrollar un excelente papel durante los estudios de posgrado, en tan prestigiosa Universidad como lo es la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme la vida y por permitirme disfrutar de este día en el cual, más que la obtención de un grado académico, puedo tener la satisfacción de concluir un objetivo más de mi vida.

A mis directores de tesis: Dr. Mario Gonzalo Vizcarra Mendoza y Dr. Carlos Martínez Vera, por su disponibilidad de tiempo, apoyo y confianza durante el desarrollo de este trabajo. A ambos les agradezco que compartieran sus conocimientos y experiencias en el área de estudio, y por hacer que las tardes de seminario no fueran pláticas rígidas, si no pláticas de mucha interacción y discusión de los resultados.

Al M. en C. Miguel Sergio Hernández Jiménez, por el apoyo en infraestructura para la toma de la temperatura en el lecho del secador, información que permitió complementar el trabajo, ya que fue útil para comparar los resultados teóricos estimados para esta variable. Estoy consciente que sin esta infraestructura, no hubiese sido posible complementar el trabajo de la tesis.

A cada uno de los revisores: Dr. Mario Gonzalo Vizcarra Mendoza, Dr. Richard Steve Ruiz Martínez y Dr. Francisco Vidal caballero Domínguez. Por sus acertados comentarios, sugerencias y puntos de vista que permitieron enriquecer y mejorar este trabajo. Y por formar parte del jurado.

A la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, a la Coordinación del Posgrado en Ingeniería Química y a los profesores que me impartieron cursos, gracias por darme la oportunidad de continuar con mi preparación académica y por compartir sus conocimientos.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada durante la realización de mis estudios de posgrado.

A mis compañeros de la Planta Piloto 2 con quienes compartí resultados experimentales, positivos y negativos. Gracias por sus sugerencias en la parte experimental y en la estructura de la tesis.

Al M. en C. Luis Alberto Verduzco Mora y M. en C. Rocío de los Ángeles García Hernández, por instruirme en el uso de la infraestructura de laboratorio y por compartir sus conocimientos en los temas de fluidización y secado, respectivamente.

Al I.Q. Daniel Gómez Luría por el apoyo incondicional durante los primeros 2 meses del posgrado y estancia en la ciudad de México, por su amistad y por ser un buen amigo con quien compartí vivencias personales.

A mis paisanos por su amistad y apoyo durante el posgrado, gracias por la confianza que depositaron en mí.

A ti, por compartir una fracción de tu tiempo conmigo, por tu cariño, confianza, y por enseñarme que la vida se tiene que disfrutar sin tener presente acontecimientos pasados. Gracias por las pláticas, comidas y diversión cinematográfica, que dejaron a un lado el hecho de ser rectas paralelas para permitirnos un punto de intersección en una región acotada del espacio, la Ciudad de México.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS .....	1
AGRADECIMIENTOS .....	3
ÍNDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE TABLAS .....	11
NOMENCLATURA .....	12
RESUMEN.....	15
ABSTRACT.....	17
INTRODUCCIÓN .....	19
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO .....	20
1.1. Los chícharos y su importancia en la salud.....	21
1.2. El secado de sólidos .....	21
1.3. Cinéticas de secado y movimiento de la humedad en los sólidos .....	23
1.4. Encogimiento volumétrico durante el secado .....	26
1.5. La tecnología de los lechos fluidizados y sus aplicaciones industriales .....	27
1.6. Caída de presión total en un lecho fluidizado y velocidad mínima de fluidización.....	31
1.7. Propiedades de las partículas utilizadas en los lechos fluidizados .....	32
1.8. Clasificación de las partículas y regímenes de fluidización .....	33
1.9. Velocidad terminal y distribuidor de aire.....	36
1.10 . Distribuidor de aire.....	37
2.1 Secado en lecho fluidizado.....	39
2.2 Encogimiento volumétrico y su efecto en el secado de alimentos .....	40
2.3 Hidrodinámica en sistemas de lecho fluidizado .....	41
3.1 Planteamiento del problema .....	44
3.2 Hipótesis.....	44
3.3 Objetivos .....	44
3.3.1 General .....	44
3.3.2 Específicos .....	44
3.4 Justificación.....	45

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA .....	46
4.1 Materiales y métodos .....	47
4.1.1 Materia prima .....	47
4.1.2 Instrumentos de medición y material de vidrio .....	47
4.1.3 Equipo experimental. ....	48
4.2 Caracterización física del chicharo fresco.....	50
4.2.1 Diámetro de partícula .....	50
4.2.4 Determinación de la masa seca .....	51
4.2.5 Determinación del contenido de humedad en base seca .....	52
4.3 Arranque y operación del equipo experimental.....	52
4.3.1 Determinación de la caída de presión en el distribuidor y lecho de chicharo .....	52
4.3.2 Determinación de las propiedades hidrodinámicas durante el secado .....	53
4.4 Caracterización hidrodinámica del secado de chicharo.....	54
4.4.1 Determinación de la caída de presión de presión en el lecho a condiciones mínimas de fluidización.....	54
4.4.2 Determinación de la altura de lecho y velocidad mínima de fluidización.....	55
4.4.3 Determinación de la fracción vacía de lecho a fluidización mínima.....	55
4.5 Secado de chicharo.....	56
4.5.1 Determinación de la densidad aparente del chicharo durante el secado .....	56
4.5.2 Determinación del encogimiento volumétrico .....	56
4.5.3 Determinación de las curvas de secado .....	56
4.5.4 Determinación de la actividad de agua.....	57
4.6 Diseño experimental.....	57
4.7 Modelos matemáticos.....	58
4.7.1 Cálculo teórico de la velocidad mínima de fluidización .....	58
4.7.2 Modelo para las curvas de secado .....	60
4.7.3 Modelos para los perfiles de temperatura de lecho .....	62
4.7.3.1 Modelo homogéneo.....	62
4.9 Metodología para la solución numérica .....	64
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	67
5.1 Distribución de tamaño de chicharo.....	68
5.2 Propiedades físicas del chicharo fresco.....	70

5.3	Propiedades hidrodinámicas del chícharo fresco .....	72
5.4	Propiedades hidrodinámicas del chícharo durante el secado .....	74
5.5	Secado de chícharo.....	75
5.5.1	Velocidad de secado.....	76
5.5.2	Tipo de encogimiento en chícharo durante el secado.....	78
5.5.3	El encogimiento volumétrico del chícharo durante el tiempo de secado .....	80
5.6.1	Efecto del encogimiento volumétrico en la caída de presión .....	81
5.6.2	Efecto del encogimiento volumétrico en la altura mínima de fluidización.....	83
5.6.3	Efecto del encogimiento volumétrico en la fracción vacía mínima de fluidización .....	84
5.6.4	Efecto del encogimiento volumétrico en la velocidad mínima de fluidización .....	85
5.7	Relación entre la hidrodinámica y el secado de chícharo.....	87
5.8	Actividad del agua y su relación con el secado.....	89
5.9	Temperaturas del lecho durante el tiempo de secado .....	90
5.10	Velocidad mínima de fluidización teórica.....	92
5.11	Coefficientes de difusión en chícharos y energía de activación .....	93
5.12	Temperatura teórica en el lecho de chícharos .....	97
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....		101
6.1	Conclusiones .....	102
6.2	Expectativas .....	103
6.3	Bibliografía .....	104
APÉNDICES .....		108
A <sub>1</sub> .	Parámetros para calcular $U_{mf}$ con y sin efectos de pared .....	114
APÉNDICE B. Modelos para ajustar el perfil de humedad .....		114
B <sub>1</sub> .	Modelo cinético.....	114
B <sub>2</sub> .	Modelo sin encogimiento volumétrico.....	115
B <sub>3</sub> .	Modelo con encogimiento volumétrico.....	116
APÉNDICE C. Modelos térmicos del secador.....		118
C <sub>1</sub> .	Modelo homogéneo.....	118
C <sub>12</sub> .	Parámetros del modelo homogéneo .....	119
C <sub>2</sub> .	Modelo hidrodinámico .....	120
C <sub>21</sub> .	Parámetros del modelo hidrodinámico .....	121
APÉNDICE D. Curva de calibración y caída de presión total para chícharo fresco.....		122

D <sub>1</sub> . Velocidad superficial del aire vs flujo volumétrico. ....	122
D <sub>2</sub> . Caída de presión en el lecho de chicharo fresco .....	122
APÉNDICE F. Datos experimentales de altura de lecho .....	124
F <sub>1</sub> . Altura mínima de fluidización en el punto central.....	124
APÉNDICE G. Datos experimentales de velocidad .....	125
G <sub>1</sub> . Velocidad mínima de fluidización en el punto central.....	125
APÉNDICE H. Datos experimentales de humedad. ....	126
H <sub>1</sub> . Datos de humedad en el punto central. ....	126
APÉNDICE I. Datos experimentales densidad aparente.....	127
I <sub>1</sub> . Datos de densidad aparente a 50°C y diferentes L/D .....	127
I <sub>2</sub> . Datos de densidad aparente en el punto central.....	127
APÉNDICE J. Datos experimentales de diámetro de chicharo.....	128
J <sub>1</sub> . Datos de diámetro de chicharo en el punto central.....	128
APÉNDICE K. Datos experimentales de encogimiento volumétrico .....	129
K <sub>1</sub> . Datos de encogimiento volumétrico en el punto central. ....	129
APÉNDICE L. Datos experimentales de temperatura de lecho a 50°C. ....	130
L <sub>1</sub> . Datos experimentales de temperatura de lecho a 60°C. ....	130
Apéndice M. Resultados teóricos de caída de presión en el lecho.....	132
Apéndice N. Resultados teóricos de caída de presión a L/D constante.....	133



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contenido de humedad en función del tiempo de secado. ....	23
Figura 2. Velocidad de secado en función del contenido de humedad.....	23
Figura 3. Elementos de un sistema en lecho fluidizado. ....	28
Figura 4. Comportamiento de los lechos a velocidades moderadas . ....	29
Figura 5. Comportamiento de los lechos fluidizados a altas velocidades . ....	30
Figura 6. Caída de presión en función de la velocidad de fluidización. Partículas de tamaño uniforme . ....	32
Figura 7. Clasificación de partículas Geldart . ....	34
Figura 8. Regímenes de fluidización en lechos fluidizados . ....	36
Figura 9. Equipo de secado utilizado en la parte experimental. ....	49
Figura 10. Equipo de secado utilizado en la parte experimental. ....	50
Figura 11. Manómetro en forma de “ U” para determinar caída de presión. ....	54
Figura 12. Medición de velocidad y altura de lecho en condiciones mínimas de fluidización. ....	55
Figura 13. Algoritmo para determinar $U_{mf}$ y temperatura de lecho con modelo homogéneo. ....	65
Figura 14. Algoritmo para determinar la temperatura de lecho con el modelo hidrodinámico. ....	66
Figura 15. Distribución de la masa del chícharo disponible para secado. ....	68
Figura 16. Contenido de humedad a diferentes horas de refrigeración para chícharo correspondiente al tamiz 1. ....	70
Figura 17. Chícharo seco (a) sin escaldado inicial (b) con escaldado inicial . ....	71
Figura 18. Caída de presión en el lecho a diferentes velocidades de aire. ....	73
Figura 19. Cambios de las variables hidrodinámicas a 50°C y diferentes relaciones L/D... 75	75
Figura 20. Curvas de secado en lecho fluidizado a diferentes relaciones L/D y temperatura del aire de secado. ....	76
Figura 21. Velocidad de secado de chícharo en lecho fluidizado. ....	77
Figura 22. Relación del contenido de humedad y el encogimiento volumétrico, para L/D = 0.5. ....	79
Figura 23. Densidad aparente relativa de chícharo a diferentes temperaturas y L/D = 0.50. ....	79
Figura 24. Encogimiento volumétrico de chícharo a diferentes relaciones L/D y temperaturas del aire de secado. ....	81
Figura 25. Encogimiento volumétrico del chícharo y su relación con la caída de presión del lecho. ....	82
Figura 26. Encogimiento volumétrico del chícharo y su relación con la altura mínima de fluidización del lecho. ....	84
Figura 27. Encogimiento volumétrico del chícharo y su relación con la fracción vacía mínima de fluidización del lecho. ....	85

Figura 28. Encogimiento volumétrico del chicharo y su relación con la velocidad mínima de fluidización del lecho.....	86
Figura 29. Velocidad mínima de fluidización, $X/X_0$ y $d_p/d_{p0}$ a una relación $L/D = 0.50$ . ....	87
Figura 30. Contenido de humedad en el chicharo secado a diferentes velocidades de aire. 88	
Figura 31. Actividad de agua a diferentes contenidos de humedad en base seca.....	89
Figura 32. Temperatura del lecho a $50^\circ\text{C}$ y relación $L/D: 0.5$ . ....	91
Figura 33. Temperatura en el interior de lecho a diferentes temperaturas y relación $L/D: 0.5$ . ....	92
Figura 34. Velocidad mínima de fluidización teórica sin/con efectos de pared a una $L/D: 0.50$ . ....	93
Figura 35. Ajuste de datos experimentales con el modelo exponencial $L/D: 0.50$ . ....	94
Figura 36. Modelos sin/con encogimiento volumétrico en los perfiles de MR para $L/D = 0.50$ . ....	96
Figura 37. Predicción de la temperatura en lecho, $L/D = 0.50$ y $50^\circ\text{C}$ . ....	97
Figura 38. Efecto de la hidrodinámica en el modelo hidrodinámico-exponencial $L/D = 0.50$ y $50^\circ\text{C}$ . ....	98
Figura 39. Efecto de la capacidad calorífica del chicharo en el modelo hidrodinámico-exponencial $L/D = 0.50$ y $50^\circ\text{C}$ . ....	99
Figura 40. Efecto de la fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización en el modelo hidrodinámico-exponencial $L/D = 0.50$ y $50^\circ\text{C}$ . ....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Investigaciones de secado en lecho fluidizado. ....	39
Tabla 2. Investigaciones de encogimiento volumétrico en experimentos de secado. ....	40
Tabla 3. Investigaciones de la hidrodinámica de secadores en lecho fluidizado. ....	41
Tabla 4. Diseño experimental para el estudio hidrodinámico del secador. ....	58
Tabla 5. Combinaciones de los modelos para perfiles de humedad y temperatura de lecho. ....	64
Tabla 6. Propiedades físicas del chícharo fresco retenido en los 3 tamices. ....	69
Tabla 7. Propiedades físicas del chícharo fresco y chícharo escaldado. ....	71
Tabla 8. Propiedades físicas del chícharo utilizando escaldado como pretratamiento. ....	72
Tabla 9. Masa de chícharo a utilizar en cada experimento. ....	72
Tabla 10. Propiedades hidrodinámicas del chícharo al tiempo $t=0$ . ....	74
Tabla 11. Actividad de agua y humedad de equilibrio de chícharo a una relación $L/D =$ 0.50. ....	90
Tabla 12. Parámetros de ajuste del modelo exponencial para $L/D = 0.50$ . ....	94
Tabla 13. Coeficientes de difusión efectivos con/ sin encogimiento volumétrico $L/D = 0.50$ . .....	95

## NOMENCLATURA

A	Área de sección transversal del secador, $m^2$ .
A'	Constante de ajuste para la relación lineal de $U_{mf}(t)/U_{mf}(t=0)$ y $X/X_0$ .
A <sub>1</sub>	Constante de ajuste para la relación lineal de $d_p/d_{p0}$ y $X$ .
A <sub>11</sub>	Constante de ajuste para la relación lineal de $d_p/d_{p0}$ y $X/X_0$ .
a <sub>w</sub>	Actividad de agua en el chícharo.
B'	Constante de ajuste para la relación lineal de $U_{mf}(t)/U_{mf}(t=0)$ y $X/X_0$ .
B <sub>1</sub>	Constante de ajuste para la relación lineal de $d_p/d_{p0}$ y $X$ .
B <sub>11</sub>	Constante de ajuste para la relación lineal de $d_p/d_{p0}$ y $X/X_0$ .
C <sub>A</sub>	Capacidad calorífica para aire seco, $J/kg^\circ K$ .
C <sub>B</sub>	Capacidad calorífica para chícharo seco, $J/kg^\circ K$ .
C <sub>d</sub>	Coefficiente de arrastre.
C <sub>v</sub>	Capacidad calorífica para vapor de agua, $J/kg^\circ K$ .
C <sub>w</sub>	Capacidad calorífica para agua líquida, $J/kg^\circ K$ .
D	Diámetro interno del secador, m.
D/d <sub>p</sub>	Relación diámetro interno del secador a diámetro de partícula.
D <sub>0</sub>	Factor preexponencial, $m^2/s$ .
d <sub>e</sub>	Diámetro equivalente al volumen de una esfera, cm.
D <sub>eff</sub>	Coefficiente de difusión efectivo de la humedad, $m^2/s$ .
d <sub>p</sub> *	Diámetro característico de partícula, cm.
d <sub>sv</sub>	Diámetro de una partícula con la misma razón de área/volumen, cm.
E <sub>a</sub>	Energía de activación, $kJ/mol$ .
g	Constante gravitacional, $m/s^2$ .
h <sub>mf</sub>	Altura mínima de fluidización, cm.
k	Constante de velocidad de secado, 1/minuto.
k <sub>0</sub>	Factor preexponencial, 1/ minuto.
KT/ε	Constante de Lennard-Jones.
L	Altura de lecho de chícharos, m.
M	Factor que involucra los efectos de pared.
m <sub>A</sub>	Flujo másico de aire en el secador $kg/minuto$ .
m <sub>B</sub>	Masa seca de chícharos en el secador, $kg$ .

$m_p$	Masa de chícharo en el lecho, kg.
MR	Humedad relativa.
$m_{ss}$	Masa seca en la determinación del contenido de humedad, g.
N	Numero de términos en la serie de Fourier.
P	Presión de operación, atm.
R	Constante universal de los gases, J/mol <sup>o</sup> K.
R'	Radio promedio de chícharo, m.
Re	Numero de Reynolds.
$R_p$	Radio del chícharo fresco, cm.
$S_b$	Encogimiento volumétrico equivalente.
Ss	Sólido seco.
Sh	Sólido húmedo.
T	Temperatura de operación, °K.
$T_0$	Temperatura inicial del chícharo en el secador, °K.
$T_1$	Temperatura inicial del aire de entrada al secador, °K.
$T_{bh}$	Temperatura de bulbo seco del aire, °K.
$T_l$	Temperatura del lecho, °K.
$u^*$	Velocidad característica.
$U_{mf}$	Velocidad superficial del aire en condiciones mínimas de fluidización, m/s.
V	Volumen del chícharo durante el secado, cm <sup>3</sup> .
$V_0$	Volumen inicial del chícharo, cm <sup>3</sup> .
$V_p$	Volumen de fluido desplazado por el chícharo, cm <sup>3</sup> .
W	Peso de partículas en lecho fluidizado.
$w_1$	Masa de chícharo en una probeta de 500 mL, g.
X	Contenido de humedad en el chícharo, kg de agua/kg ss.
$X_0$	Contenido inicial de humedad en el chícharo, kg de agua/kg ss.
$X_c$	Contenido crítico de humedad, kg de agua/kg de ss.
$X_e$	Contenido de humedad en equilibrio, kg de agua/kg de ss.
Y	Humedad del aire a la salida del secador, kg de agua/kg de aire seco.
$Y_1$	Humedad del aire a la entrada del secador, kg de agua/kg de aire seco.
Z	Humedad por unidad de volumen, kg de agua/m <sup>3</sup> .kg de ss.

$Z_e$  Humedad de equilibrio por unidad de volumen, kg de agua/m<sup>3</sup>.kg de ss.

### Letras griegas

$\Delta P_{mf}$	Caída de presión total en el secador, cm de agua.
$\Delta P_b$	Caída de presión en el lecho de chicharo, N/m <sup>2</sup> .
$\Delta H$	Entalpía de vaporización de agua, J/kg <sup>o</sup> K.
$\epsilon_m$	Fracción vacía en un lecho fijo.
$\epsilon_{mf}$	Fracción vacía en lecho a condiciones mínimas de fluidización.
$M$	Viscosidad dinámica del aire, kg/m.s.
$\rho_e$	Densidad empacada de chicharo, kg/m <sup>3</sup> .
$\rho_g$	Densidad del aire, kg/m <sup>3</sup> .
$\rho_p$	Densidad aparente del chicharo, kg/m <sup>3</sup> .
$\rho_s$	Densidad del chicharo seco, kg de ss/m <sup>3</sup> .
$\Phi$	Esfericidad de partícula.
$\Omega$	Potencial de Lennard- Jones.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación, tuvo como objetivo estudiar el efecto del encogimiento volumétrico de chícharo en la hidrodinámica de un secador de lecho fluidizado. Las variables hidrodinámicas estudiadas fueron: la caída de presión en el secador, la velocidad superficial del aire, la altura de lecho y la fracción vacía en el lecho, a condiciones mínimas de fluidización.

Debido al encogimiento volumétrico del chícharo durante el transcurso del secado, la caída de presión en el secador, la altura de lecho y velocidad superficial del aire, en condiciones mínimas de fluidización, disminuyeron en un 85%, 45% y 40% de su valor correspondiente a chícharo fresco, respectivamente.

El chícharo seco disminuyó 23.3% su diámetro de partícula, 61.1% su densidad aparente y 66.6% su densidad empacada, durante el tiempo de secado. Además, presentó encogimiento volumétrico no ideal, es decir, su pérdida de masa no fue directamente proporcional a su pérdida de volumen. El encogimiento volumétrico del chícharo tuvo un valor aproximado de 0.44, que equivale a una pérdida del 56% de su volumen inicial.

Las curvas de secado para chícharo, se ajustaron a tres modelos matemáticos: modelo exponencial, modelo sin encogimiento volumétrico y modelo con encogimiento volumétrico. El primer modelo tuvo como parámetro de ajuste la constante de velocidad de secado; y los dos últimos, el coeficiente de difusión efectivo de la humedad, debido a que se encontró que el chícharo presentó periodo de secado decreciente, el cual es controlado por un mecanismo de difusión.

Los tres modelos se ajustaron a los datos experimentales del contenido de humedad. Las constantes de velocidad de secado y los coeficientes de difusión efectivos, se ajustaron a una ecuación tipo Arrhenius, obteniendo energías de activación en el intervalo de 33-46 kJ/mol para el chícharo. Los coeficientes de difusión efectivos a las tres diferentes temperaturas del aire se mantuvieron en un intervalo de  $3.94 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $8.68 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para el modelo sin encogimiento volumétrico, y en el intervalo de  $2.94 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $8.16 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para el modelo con encogimiento volumétrico.

La fracción vacía en el lecho a condiciones mínimas de fluidización disminuyó durante el tiempo de secado posiblemente al efecto del encogimiento volumétrico del chícharo que provocó la disminución de la altura del lecho. Este parámetro fue importante en la estimación teórica de la velocidad superficial en condiciones mínimas de fluidización.

La velocidad superficial del aire en condiciones mínimas de fluidización se estimó teóricamente a partir de dos ecuaciones, una de ellas tomó en cuenta los efectos de pared en el secador y la otra consideró despreciable este fenómeno. Los resultados obtenidos indicaron la posibilidad de que los efectos de pared fueran importantes durante los primeros 60 minutos de secado, tiempo en el cual la relación del diámetro de secador a diámetro de chícharo fue 10.54.

El comportamiento hidrodinámico del secador estuvo relacionado directamente con el secado y éste a la vez con el encogimiento volumétrico, pues a medida que el chícharo perdía humedad; el diámetro, la densidad empacada y la fracción vacía en el lecho disminuyeron. Esto provocó que la caída de presión en el secador, altura de lecho y velocidad superficial, en condiciones mínimas de fluidización, también disminuyeran.

Las temperaturas en el lecho de chícharo se estimaron teóricamente a partir de dos modelos: modelo homogéneo y modelo hidrodinámico, este último se ajustó mejor a los datos experimentales, y hace uso de la altura de lecho, fracción vacía, densidad aparente y contenido de humedad, medidos en la parte experimental.



## **ABSTRACT**

In this work, the effect of volumetric shrinkage of pea in the hydrodynamics of a fluidized bed dryer was studied. The main hydrodynamic variables studied were: the pressures drop in the dryer, the air superficial velocity, the height of bed dryer, finally the bed void and the fraction in the empty bed, at velocity minimal of fluidization.

Due to the volumetric shrinkage of the pea during drying, the pressure drop in the dryer, the height of bed and superficial velocity of the air in minimal conditions of fluidization, decreased by 85 %, 45% and 40% of its value to fresh pea, respectively.

The dry pea declined 23.3 % its diameter, 61.1 % its apparent density, and 66.6 % its density packed, during the drying time. In addition, he introduced volumetric shrinkage not ideal, that is to say, its mass loss was not directly proportional to its loss of volume. The volumetric shrinkage of the pea had an approximate value of 0.44, which equates to a loss of 56% of its initial volume.

The drying curves for pea were adjusted to three models: exponential model, model without shrinkage and volumetric model with volumetric shrinkage. The first model was as a parameter to adjust the constant of speed of drying, and the last two, the effective diffusion coefficient of the moisture content, since it was found that pea presented decreasing drying period, which is controlled by a mechanism for dissemination of the humidity during drying of the same.

All three models were adjusted to the experimental data of the moisture content, and the constants of drying speed and effective diffusion coefficients obtained, obeyed the Arrhenius equation, obtaining activation energies in the range of 33-46 kJ/mol for the pea. The effective diffusion coefficients at the three temperatures for the drying air were in the range of  $3.94 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $8.68 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , for the model without volumetric shrinkage, and in the interval of  $2.94 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $8.16 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  for the model with volumetric shrinkage.

The fraction in the empty bed to minimal conditions of fluidization declined during the drying time by effect of the volumetric shrinkage of pea, and this parameter was important in the theoretical estimation of the surface speed minimum conditions of fluidization.

The surface speed of the air in minimal conditions of fluidization is notionally estimated from two equations, one of them took into account the effects of wall in the dryer, and the other considered negligible this phenomenon. The results obtained indicated that the effects of wall were important during the first 60 minutes of drying, because this time the ratio of the diameter of dryer to diameter of pea was 10.54.

The hydrodynamic behavior of the dryer was directly related to the drying, because as the pea lost moisture; its diameter, its density and the fraction packed in the empty bed decreased. This meant that the pressure drop in the dryer, bed height and speed, surface conditions of minimum fluidization, also decreased.

Temperatures in the bed of peas were estimated theoretically from two models: model homogeneous and hydrodynamic model. The latter was better fitted to the experimental data.

## INTRODUCCIÓN

El secado es una operación unitaria importante en la conservación de alimentos y en muchas otras industrias, debido que disminuye el contenido de humedad a valores inferiores al 10 % peso, inhibe el crecimiento de enzimas y microorganismos responsables de reacciones químicas que provocan la descomposición de los mismos, incrementado así, su tiempo de vida de anaquel (Geankoplis, 1998). Esta operación unitaria se lleva a cabo por el contacto entre un sólido y un gas, donde intervienen fenómenos de transferencia de calor y masa de manera simultánea (Krokida et al., 2003).

La fluidización es un fenómeno mediante el cual un lecho de partículas sólidas se suspende en el seno de un fluido (gas o líquido), adquiriendo las partículas un comportamiento semejante a éste. Algunas aplicaciones industriales de los lechos fluidizados son: el craqueo catalítico de hidrocarburos, combustión e incineración, gasificación, calcinación, tratamiento de minerales y secado de alimentos. El uso de lechos fluidizados permite mantener un mezclado adecuado de partículas con elevados coeficientes de transferencia de calor y masa (Pyle, 1950).

En el secado de muchos alimentos uno de los cambios físicos más importantes que presentan es la disminución de su tamaño. La pérdida de agua y el calentamiento causan estrés en la estructura celular del alimento. Cuando el agua es removida se produce un desequilibrio de presión entre el interior y exterior del alimento, lo que conduce al encogimiento volumétrico, colapso de la estructura, cambios en la forma y ocasionalmente formación de grietas en el producto seco (Mayor y Sereno, 2004).

El encogimiento volumétrico afecta el diámetro de partícula, el cual es uno de los parámetros que más influye en la hidrodinámica de lechos fluidizados. En condiciones de fluidización puede disminuir la velocidad superficial del aire, la caída de presión en el secador y la altura del lecho. Por ello, en este trabajo se estudia el secado de chícharo (*Pisum sativum*) en lecho fluidizado y se pretende encontrar la influencia del encogimiento volumétrico sobre la hidrodinámica del secador.

## **CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO**

---

En este capítulo se presenta información sobre la operación de secado en alimentos y los principales conceptos y características de los lechos fluidizados.

---

## **1.1. Los chícharos y su importancia en la salud**

Los chícharos o guisantes son tubérculos que pertenecen a la familia de las Leguminosas con tallos ramificados trepadores que pueden alcanzar alturas de 2 metros. Es un cultivo de clima templado y algo húmedo, su óptimo crecimiento se obtiene a temperaturas comprendidas entre 16°C y 20°C, y su producción máxima se obtiene a 35°C (Cyrus, 1911).

En América Latina los guisantes son conocidos con el nombre de arvejas o chícharos, pero su nombre científico es *Pisum sativum* (Cyrus, 1911).

Algunas de las características más importantes de los guisantes en el aspecto de la salud son:

- Aportan gran cantidad de fibra, hidratos de carbono y azúcares al cuerpo humano.
- Tiene vitamina A, potasio, fósforo, calcio, hierro y sodio.
- Son ricos en ácido ascórbico, tianina (vitamina B<sub>1</sub>), riboflavina (vitamina B<sub>2</sub>) y niacina (vitamina B<sub>3</sub>).

El consumo de chícharo ayuda a controlar los niveles de azúcar en el torrente sanguíneo, en pacientes con diabetes disminuye la dependencia de la insulina por su contenido de componentes anti glucémicos. Además, ayuda a mejorar la circulación y la salud del corazón, evitando la formación de placas dentro de las arterias. Disminuye también la angina de pecho o infarto al miocardio, debido a que poseen propiedades contra la hipercolesterolemias para disminuir el colesterol malo en la sangre (Quiminet, 2011).

## **1.2. El secado de sólidos**

El secado es una operación unitaria que requiere el contacto de un sólido húmedo con un gas a altas temperaturas, y consiste en la extracción deliberada de agua del medio sólido en la que intervienen los fenómenos de transferencia de calor y masa de manera simultánea (Krokida et al., 2003). El calor se transporta al sólido por mecanismo de conducción y convección en el caso de los sólidos secados por lecho fluidizado, en donde es más común el mecanismo de transferencia de calor por convección (Aguilera y Stanley, 1999).

Para establecer las condiciones adecuadas que permitan la remoción de humedad, es importante conocer la forma en la que ésta se encuentra distribuida en el medio sólido. En general la humedad puede estar en forma de:

- **Humedad ligada:** Es aquella que se encuentra en combinación química formando una solución líquida con el sólido (Brennan et al., 1980) y ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del agua pura a la misma temperatura (Treybal, 1993), razón por la cual este tipo de humedad es más complicada de remover ya que las condiciones de operación puede deteriorar el sólido.
- **Humedad no ligada:** Es la humedad se encuentra en exceso y ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del agua pura a la misma temperatura (Treybal, 1993), razón por la cual este tipo de humedad es más fácil de remover sin modificar la composición química del sólido.
- **Humedad en equilibrio:** Es la humedad limitante a la cual el material dado se puede secar en condiciones específicas de temperatura y humedad del aire (Treybal, 1993).

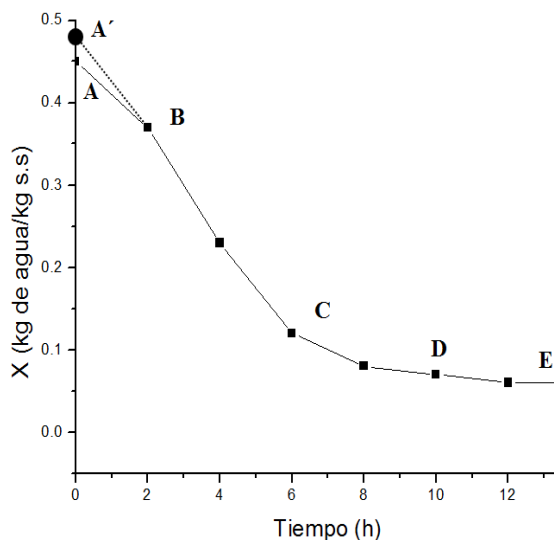
Independientemente de su clasificación, la humedad se puede cuantificar en términos de la masa de agua por unidad de masa de sólido seco (base seca) o en términos de la masa de agua por unidad de masa de sólido húmedo (base húmeda). La primera se reporta en unidades de kg de agua/kg ss y se simboliza con la letra X, y la segunda se reporta en unidades de kg de agua/kg de sh.

Otro parámetro importante en el secado de alimentos, es la actividad de agua ( $a_w$ ), que se define como la relación de la presión de vapor de agua en el sólido (alimento) y la presión de vapor de agua pura a la misma temperatura del sólido. La actividad de agua está relacionada con la humedad disponible en el alimento para el crecimiento de microorganismo y actividad enzimática. Este parámetro tiene un valor máximo de 1 y un valor mínimo de 0. Los alimentos con baja actividad de agua ( $a_w \approx 0.60$ ) se conservan en óptimas condiciones durante períodos largos de tiempo. Por el contrario, aquellos alimentos cuya actividad de agua es elevada ( $a_w \approx 0.95$ ) están sometidos a contaminación microbiológica y su conservación es mucho más delicada.

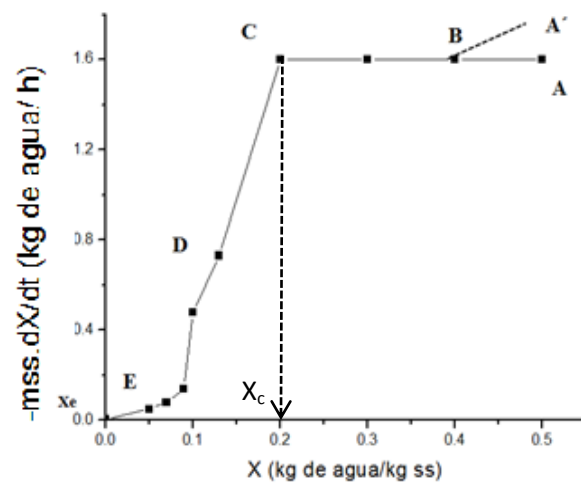
Debido a que los microorganismos influyen en la conservación de los alimentos, una manera de inhibir la actividad enzimática es el escaldado, tratamiento térmico que consiste en exponer los alimentos en un baño de agua (entre 95°C y 199°C) durante unos minutos. Este tratamiento se aplica a sistemas tisulares (tejidos) como etapa previa a otras operaciones unitarias como la congelación, enlatado, liofilización, o secado.

### 1.3. Cinéticas de secado y movimiento de la humedad en los sólidos

La teoría clásica de la operación de secado está basada en las curvas de secado, que relacionan el contenido de humedad en función del tiempo de secado (Figura 1), y la velocidad de secado ( $-m_{ss} \frac{dX}{dt}$ ) en función del contenido de humedad (Figura 2) (Foust, 1996).



**Figura 1.** Contenido de humedad en función del tiempo de secado.



**Figura 2.** Velocidad de secado en función del contenido de humedad.

Durante el secado de un sólido ocurren dos fenómenos simultáneos: 1) se transfiere calor para evaporar el líquido y 2) se transfiere masa en estado líquido o vapor en el interior del sólido, y como vapor desde la superficie del sólido, esta transferencia se debe al gradiente de presión entre la presión parcial del vapor de agua en el aire y la presión parcial del agua en la superficie del sólido.

Una curva típica de secado se presenta en la Figura 1, y la tendencia de esta curva es semejante para muchos alimentos. Geankoplis (1998) menciona que en una curva típica de secado existen tres etapas o períodos importantes:

- Período inicial o de ajuste a las condiciones de secado, representado en el segmento A-B o A'-B, y corresponde a un estado inestable durante el cual la temperatura del sólido se pone en equilibrio térmico con el aire de secado, generalmente este período es corto y frecuentemente se ignora en análisis subsecuentes del secado.
- Período de velocidad constante, representado por el segmento B-C, en este período la superficie total expuesta está saturada de agua y alcanza la temperatura de bulbo húmedo del aire ( $T_{bh}$ ), estableciéndose así, una fuerza impulsora para la transferencia de calor del aire al sólido. La evaporación del agua en la superficie del sólido, es lo que provoca la difusión de la humedad desde el interior hasta la superficie en forma de líquido dentro del sólido y como vapor desde la superficie del sólido hacia el aire.

La rapidez a la cual se evapora la humedad puede describirse en función de un coeficiente de convección para la transferencia de masa, y del gradiente de humedad entre el aire y la superficie del sólido. Este período termina cuando se ha alcanzado un contenido de humedad crítico ( $X_c$ ) (Figura 2). Después de este punto la temperatura de la superficie aumenta y la velocidad de secado decae con rapidez.

- Período de velocidad decreciente, representado por el segmento C-D, es conocido como primer período de velocidad decreciente, inicia cuando el sólido tiene el contenido de humedad crítico y termina cuando la superficie del sólido se seca por completo, es decir se elimina en su totalidad la humedad no ligada. En este período la película superficial de humedad del sólido comienza a agotarse debido a que la velocidad de movimiento de la humedad a la superficie es menor que la velocidad de transferencia de masa desde la superficie. El segundo período de velocidad decreciente está representado por el segmento D-E, en este período la superficie del sólido se encuentra totalmente seca y la difusión de la humedad interna controla la velocidad de secado.



Los diferentes mecanismos del movimiento de la humedad desde el interior hasta la superficie del sólido afectan el secado durante los periodos de velocidad constante y velocidad decreciente. A continuación se analizan tres teorías citadas por Geankoplis (1998) para explicar las de curvas de secado en periodo de velocidad decreciente.

**1. Teoría de la difusión del líquido:** De acuerdo con esta teoría, la difusión de la humedad líquida se verifica cuando existe una diferencia de concentración entre el interior del sólido y la superficie. Este método de transporte de humedad casi siempre se presenta en sólidos no porosos, en los que se forman soluciones de una sola fase con la humedad, como en una pasta, un jabón, pegamento o una gelatina. También es el caso del secado de las últimas porciones de humedad en arcillas, harinas, madera, cuero, papel, almidones y textiles. En el secado de muchos materiales alimenticios, el movimiento del agua durante el periodo de velocidad decreciente se verifica por difusión.

**2. Movimiento capilar en los sólidos porosos:** Cuando se están secando sólidos granulares y porosos como arcillas, arena, tierra, pigmentos para pinturas y minerales, la humedad no ligada o sin combinar, se desplaza a través de capilares y espacios vacíos de los sólidos por acción capilar, y no por difusión. Este mecanismo, en el cual interviene la tensión superficial, es similar al desplazamiento del combustible en la mecha de un quinqué portátil.

Un sólido poroso contiene huecos y canales interconectados de diversos tamaños. A medida que se evapora el agua, se forma un menisco de líquido en cada poro en el interior del sólido. Esto origina las fuerzas capilares por la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas constituyen el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie. Los poros pequeños desarrollan fuerzas mayores que los poros más grandes.

**3. Efecto de la contracción:** Un parámetro que afecta con frecuencia a la velocidad de secado es la contracción del sólido al perder humedad. Los sólidos rígidos no se contraen de manera apreciable, pero los materiales coloidales y fibrosos, como vegetales y otros productos alimenticios, sí se contraen. El efecto más notable es que se puede desarrollar una capa dura en la superficie del sólido, que puede resultar impermeable al flujo de líquido

o de vapor y disminuir la velocidad de secado. En muchos alimentos si el secado se realiza a temperaturas elevadas (90°C), se forma una capa de células contraídas que se adhieren unas a otras formando un sello. Esto representa una barrera a la migración de la humedad, y se llama endurecimiento superficial (Geankoplis, 1998).

#### **1.4. Encogimiento volumétrico durante el secado**

Uno de los cambios físicos más importantes que presentan los alimentos durante el secado es la reducción de su tamaño. La pérdida de agua y el calentamiento causan estrés en la estructura celular del alimento. Cuando el agua es eliminada, se produce un desequilibrio de presión entre el interior y exterior del alimento, lo que conduce al encogimiento o colapso de la estructura, cambios en la forma y ocasionalmente formación de grietas en el producto (Mayor y Sereno, 2004).

Durante el secado el encogimiento de los alimentos puede cuantificarse en términos de su longitud, área o volumen. Cuando se cuantifica a partir del volumen, se conoce como encogimiento volumétrico (Lozano et al., 1983) y la siguiente expresión es utilizada:

$$S_b = \frac{V}{V_0} \quad (1)$$

Un valor unitario para  $S_b$  indica un encogimiento volumétrico nulo en el sólido, y un valor de 0 establece un encogimiento volumétrico total. En otras palabras,  $S_b$  representa la fracción de volumen inicial que conserva el sólido durante el secado, mientras que la pérdida de volumen en el sólidos está dado por  $1 - S_b$ .

El encogimiento volumétrico es una consecuencia de la evaporación del agua contenida en una matriz sólida. Si la pérdida de volumen en el sólido es directamente proporcional a la pérdida de masa, el encogimiento volumétrico se conoce como ideal. Pero en el caso que la pérdida de volumen sea mayor o menor que el volumen de agua evaporada, el encogimiento volumétrico se conoce como no ideal. (Madiouli et al., 2007).

### **1.5. La tecnología de los lechos fluidizados y sus aplicaciones industriales**

Geankoplis (1998), presenta diversos métodos de secado y los clasifica de dos maneras; procesos por lotes, cuando una carga de material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo de tiempo; o continuos, si el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo.

La fluidización es el fenómeno mediante el cual un lecho de partículas sólidas se suspende en el seno de un gas o un líquido, adquiriendo un comportamiento semejante al fluido. Algunas aplicaciones industriales de los lechos fluidizados son craqueo catalítico de hidrocarburos, combustión e incineración, gasificación, calcinación, tratamiento de minerales y secado de alimentos. El uso de lechos fluidizados en la industria se debe a que de esta manera es posible obtener un mezclado adecuado de partículas y elevados coeficientes de transferencia de calor y masa (Pyle, 1950).

En general las operaciones y procesos unitarios en lechos fluidizados presentan las siguientes ventajas:

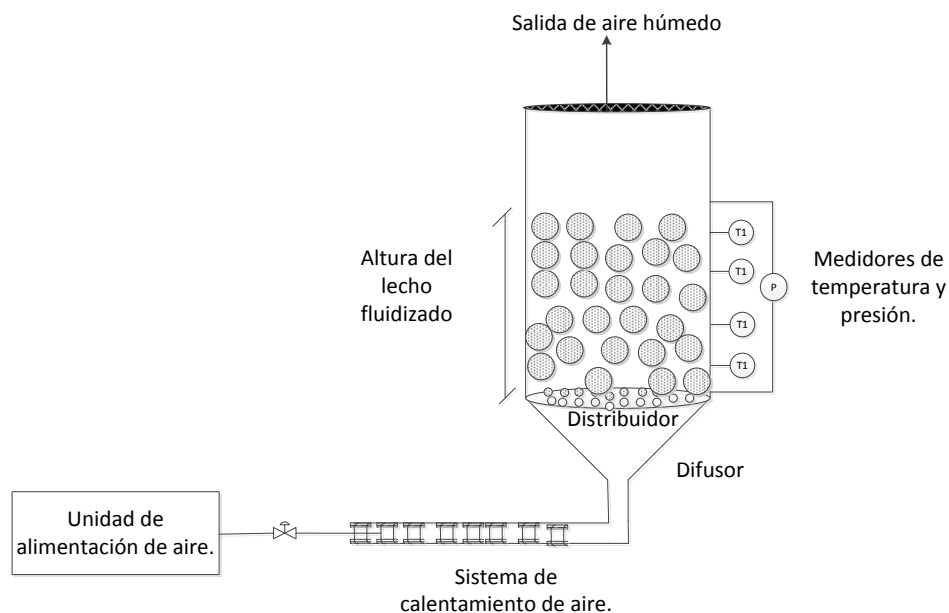
- Altas velocidades de transferencia de masa y calor entre las partículas y el gas, provocada por el mezclado intensivo debido a la presencia de burbujas.
- Control adecuado de temperaturas evitando posibles degradaciones térmicas en sólidos biológicos y alimenticios.

Sin embargo, este tipo de tecnología también tiene desventajas, entre las cuales se pueden mencionar:

- Un aumento de la potencia en el compresor o ventilador, por las altas caídas de presión que se presentan en el lecho fluidizado al aumentar el tamaño del secador.
- Los sólidos a secar en estos equipos deben ser resistentes para no sufrir desgaste o roturas, si este factor no es de importancia para la selección, debe tenerse en mente la necesidad de realizar recuperaciones periódicas de finos.
- La erosión en depósitos y tuberías debida a la abrasión por las partículas puede ser pronunciada. Por otra parte, las partículas finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser reemplazadas.

Un sistema típico de lecho fluidizado con aplicación a secado de alimentos (Figura 3) está integrado por los siguientes elementos:

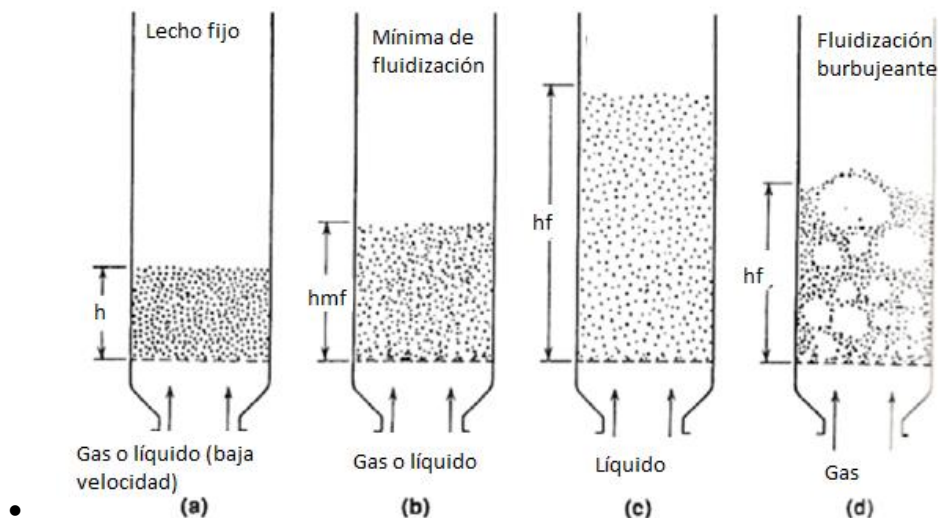
- **Unidad de alimentación de aire:** Comprende un compresor o un ventilador que proporciona el aire para llevar a cabo el secado.
- **Cámara de fluidización:** Comprende la sección anular de un tubo circular con un diámetro interno y altura determinada.
- **Distribuidor de aire:** Comprende una sección transversal circular con cierto número de orificios distribuidos en un arreglo (triangular o cuadrado) determinado.
- **Difusor:** Comprende una sección cónica que permite distribuir el aire de entrada al secador a través de los orificios del distribuidor.
- **Instrumentación:** Instrumentos que permiten medir variables típicas de estos sistemas, por ejemplo: la caída de presión en el secador (manómetros), temperatura de lecho (termopares) y altura de lecho (mirilla de nivel).



**Figura 3.** Elementos de un sistema en lecho fluidizado.

En las Figuras 4 y 5 se observa un lecho vertical relleno de partículas sólidas esféricas de tamaño uniforme, para velocidades moderadas y altas, las siguientes características son ciertas:

- Si la velocidad del fluido ( $U$ ) es muy baja, el aire no podrá contrarrestar el peso de las partículas, esta es la principal característica de un lecho fijo (Figura 4a).
- Existe un valor de velocidad superficial del fluido en la cual el lecho se comporta como un fluido (Figura 4b), a esta velocidad se le conoce velocidad superficial en condiciones mínimas de fluidización ( $U_{mf}$ ).
- Si la velocidad superficial de operación está por arriba de la velocidad superficial en condiciones mínimas de fluidización, se observará expansión del lecho, bajo estas condiciones se presenta una fluidización homogénea (Figura 4c).
- Cuando la velocidad superficial de operación se aumenta sobre la velocidad superficial en condiciones mínimas de fluidización, los lechos gas-sólido presentan burbujas y canalización de gas (Figura 4d). La formación de burbujas provoca que la agitación en el lecho sea vigorosa, y este no se expande más allá de su altura en condiciones mínimas de fluidización, a este tipo de operación se la denomina comúnmente fluidización burbujeante.

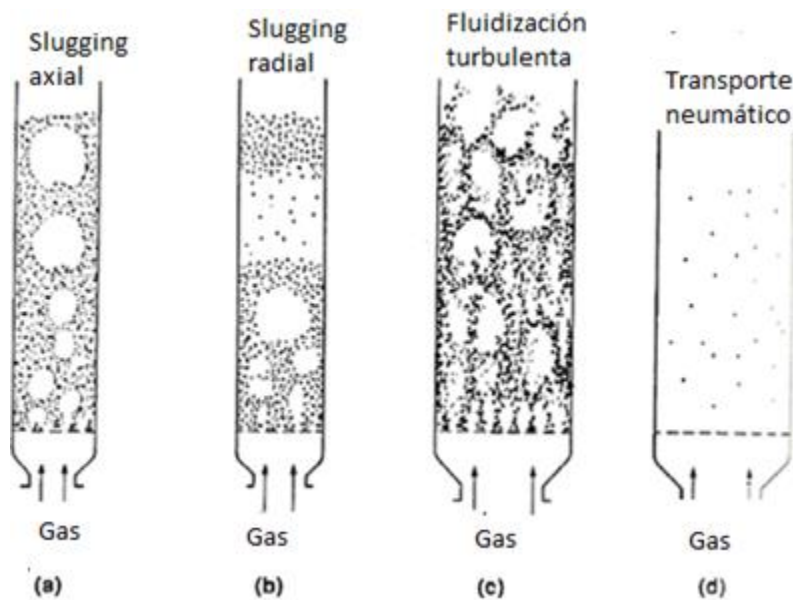


**Figura 4.** Comportamiento de los lechos a velocidades moderadas (Kunii y Levenspiel, 1991).

- En régimen burbujeante, las burbujas pueden presentar coalescencia, es decir, unirse y crecer a medida que ascienden por el lecho, y eventualmente pueden ser lo suficientemente grandes como para expandirse a lo ancho del lecho. Si se trata de partículas pequeñas, ellas fluyen hacia abajo en las cercanías de la pared, alrededor

de los paquetes de gas que ascienden (Figura 5a). Si las partículas son más grandes, el lecho que queda debajo de una burbuja es empujado como con un pistón. Los sólidos se reintegran al lecho porque “llueven” a través de los paquetes de gas (Figura 5b). Este comportamiento suele presentarse en lechos con pequeños diámetros.

- Cuando el lecho se fluidiza a altas velocidades, la velocidad terminal de las partículas podría superarse, en este caso la superficie superior del lecho se desdibuja. El gas se lleva partículas y en lugar de burbujas se observa un movimiento turbulento de paquetes de sólidos y espacios llenos de gas de varias formas y tamaños (Figura 5c). En estas condiciones el lecho se denomina lecho fluidizado turbulento. Pero si esta velocidad de operación se continúa aumentando, los sólidos serán arrastrados fuera del lecho, observando lo que se conoce como transporte neumático de los sólidos. (Figura 5d).

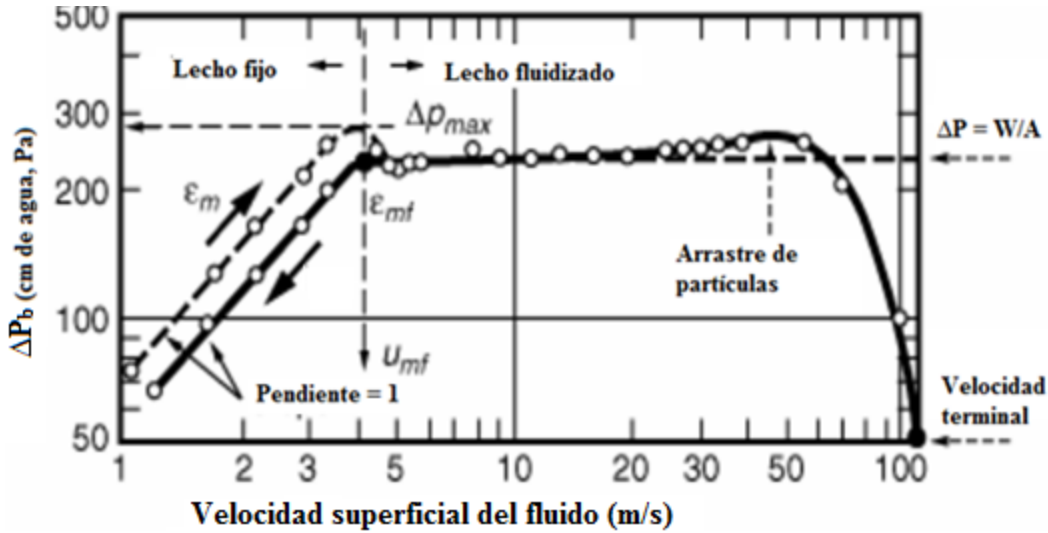


**Figura 5.** Comportamiento de los lechos fluidizados a altas velocidades (Kunii y Levenspiel, 1991).

## 1.6. Caída de presión total en un lecho fluidizado y velocidad mínima de fluidización

La Figura 6 muestra una gráfica típica de la caída de presión en un lecho de partículas de tamaño uniforme. Se observa que la caída de presión en el lecho fijo aumenta a medida que la velocidad del fluido se incrementa. Usualmente se alcanza una caída de presión máxima que es ligeramente mayor que la presión estática del lecho ( $\Delta P_{\max}$ ). Al aumentar la velocidad superficial del fluido, el lecho se desempaca, en otras palabras la fracción vacía mínima de fluidización es mayor que la fracción vacía en lecho fijo ( $\epsilon_{mf} > \epsilon_m$ ), lo que ocasiona una disminución de la caída de presión en el lecho W/A (peso de sólidos neto/área transversal del lecho). Si se incrementa la velocidad superficial del fluido, por arriba de la velocidad superficial en las condiciones mínimas de fluidización, el lecho no experimenta aumentos en la caída de presión ya que la fase gas-sólido está bien aireada y puede deformarse fácilmente sin ofrecer una resistencia apreciable, es decir, el lecho está fluidizado. Esto es análogo al hecho de tener un tanque lleno de líquido e intentar pasar un gas desde el fondo, primero debemos vencer la presión hidrostática del líquido la cual será independiente del caudal del gas que pasemos.

Cuando de un estado fluidizado se disminuye progresivamente la velocidad del aire, las partículas se van asentando formando un lecho fijo menos compacto que el original, consecuentemente la caída de presión es menor (línea negra con flecho descendente).



**Figura 6.** Caída de presión en función de la velocidad de fluidización. Partículas de tamaño uniforme (Kunii y Levenspiel, 1991).

### 1.7. Propiedades de las partículas utilizadas en los lechos fluidizados

El diámetro equivalente ( $d_e$ ) de una partícula irregular, es el diámetro que tendría una esfera con el mismo volumen de la partícula. Este diámetro se puede determinar de manera experimental a partir del volumen de aceite desplazado por la partícula (García, 2012) y evaluarse con la ecuación (2). Sin embargo, para partículas esféricas el diámetro equivalente es numéricamente igual al el diámetro de la partícula.

$$d_e = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad (2)$$

La esfericidad ( $\phi$ ) de una partícula es la relación entre el área de una esfera calculada con su diámetro equivalente y el área real de la partícula. La esfericidad se puede calcular a partir de la ecuación (3). En partículas esféricas la esfericidad es 1 y en el partículas en forma de cubos es 0.81 por ejemplo (Telis y Sobral, 2003).

$$\phi = \left( \frac{\text{Área de la esfera}}{\text{Área de la partícula}} \right)_{\text{volumen}} \quad (3)$$



La porosidad o fracción vacía ( $\epsilon_m$ ) en un lecho de partículas, es el espacio libre que queda entre las partículas. Para un lecho fluidizado en condiciones mínimas, la fracción vacía se puede calcular con la ecuación (4) (Kunii, 1984).

$$\epsilon_{mf} = 1 - \frac{m_p / (\rho_p - \rho_g)}{A \cdot h_{mf}} \quad (4)$$

La masa de las partículas durante el secado (sin sacar muestra) se puede estimar en términos del contenido de humedad en bases seca y del contenido de masa seca ( $m_{ss}$ ) a partir de la ecuación (5).

$$m_p = m_{ss} (1 + X) \quad (5)$$

Al combinar las ecuaciones (4) y (5) se obtiene la ecuación (6), que permite calcular la fracción vacía del lecho en condiciones mínimas de fluidización en términos de la humedad del chícharo.

$$\epsilon_{mf} = 1 - \frac{m_{ss} (1 + X) / (\rho_p - \rho_g)}{A \cdot h_{mf}} \quad (6)$$

### 1.8. Clasificación de las partículas y regímenes de fluidización

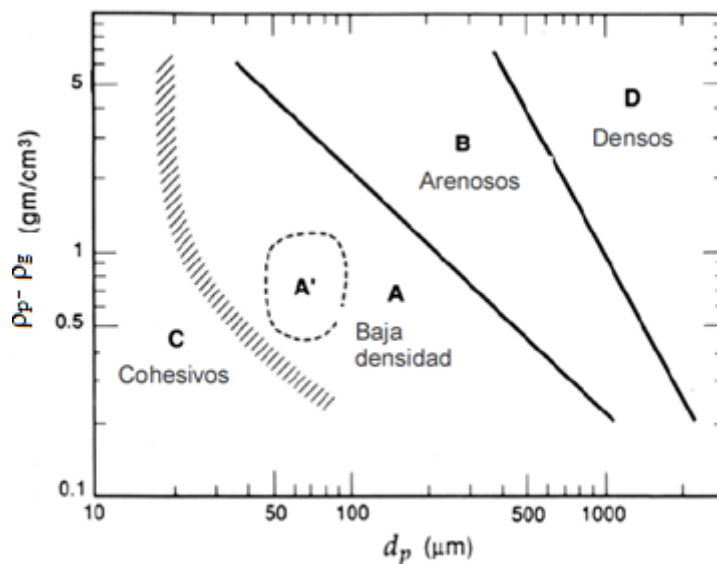
Geldart (1978) estudió la fluidización de un gran número de partículas con diferentes geometrías y tamaños, y encontró que existían cuatro clases de partículas bien definidas, según su diferencia de densidad ( $\rho_p - \rho_g$ ) y su diámetro de partícula. En la Figura 7 se presenta gráficamente la clasificación de las mismas y a continuación se describen cada una de ellas:

**Grupo A:** Este tipo de partículas son llamadas aireables, poseen un diámetro promedio de 20  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$  y baja densidad aparente ( $\rho_p < 1400 \text{ kg/m}^3$ ). Estas partículas fluidizan fácilmente y de manera suave a bajas velocidades del fluido, mientras que a altas velocidades presenta un burbujeo controlado de pequeñas burbujas

**Grupo B:** Estos sólidos fluidizan bien, se forman burbujas que crecen considerablemente. Las burbujas aparecen tan pronto como se alcanza la velocidad mínima de fluidización. El diámetro de partícula está en el intervalo de  $40 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$  y su densidad aparente va de  $1400 \text{ kg/m}^3 < \rho_p < 4000 \text{ kg/m}^3$ .

**Grupo C:** Las partículas son cohesivas y generalmente polvos. Es muy complicado lograr una fluidización porque las fuerzas entre partículas son difíciles de vencer. Como ejemplo podemos citar las harinas, almidón, etc. Para poder fluidizarlas deben ser mezcladas con partículas de mayor tamaño.

**Grupo D:** Con este tipo de sólidos se obtienen lechos de chorro estables (*spouted beds*). En general el gas presenta canalización, y se requieren grandes caudales de aire para lograr la fluidización. En estos casos los lechos burbujeantes pueden lograrse si se utilizan lechos de poca altura y si la velocidad superficial no es mucho mayor que la velocidad superficial mínima fluidización.



**Figura 7.** Clasificación de partículas Geldart (Kunii y Levenspiel, 1991).

Varios investigadores han construido mapas de operación para identificar a priori el tipo de comportamiento que tendrá el sistema fluidizado. La Figura 8 presenta los regímenes de operación más comunes, según el valor de la abscisa ( $d_p^* = x^*$ ) y el valor de la ordenada  $u^*$ , determinadas a partir de las ecuaciones 7 y 8 respectivamente:

$$d_p^* = d_p \left[ \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (7)$$

$$u^* = u_0 \left[ \frac{\rho_g^2}{\mu (\rho_p - \rho_g) g} \right]^{1/3} \quad (8)$$

**Régimen corpuscular:** Se presenta en partículas tipo A, el gas pasa por los huecos sin formar burbujas, el lecho se observa como una sola fase, las condiciones de velocidad del gas son bajas, expandiendo en lecho cuando se opera a presiones altas o densidades altas del gas.

**Régimen burbujeante:** Se presenta en partículas del tipo B y D; las burbujas de aire aparecen tan pronto como se alcanza la velocidad mínima de fluidización y agitan vigorosamente los sólidos. Aunque la existencia de la coalescencia es ineludible al aumentar la velocidad superficial, se forman dos fases llamadas fase burbuja y fase densa, ésta última contiene la mayoría de las partículas.

**Régimen turbulento:** Al aumentar la velocidad superficial se abandona el régimen burbujeante a tal grado que las dos fases constituyentes no llegan a distinguirse, debido a la explosión de las burbujas, y en este caso la altura del lecho es difusa.

**Taponamiento (Cortocircuito):** Este régimen se caracteriza por la presencia de burbujas del tamaño del lecho y forma tapones de aire, estos se presentan en diámetros pequeños o en relaciones altura/diámetro  $\gg 1$ . Estos tapones se rompen en la superficie del lecho.

**Régimen en erupción:** Este régimen surge cuando el gas se inyecta verticalmente en una abertura pequeña en el fondo del lecho, las partículas se arrastran por el chorro de gas hasta la superficie y regresan al lecho, pegado a las paredes del mismo, esto provoca un mezclado más regular y cíclico que el lecho burbujeante.

**Formación de canales:** El régimen se forma en partículas del tipo C donde los sólidos forman agregados por las fuerzas cohesivas presentes, de tal manera que el gas no puede fluidizar al sólido y solo forma ductos o agujeros por donde éste pasa y abandona el lecho.

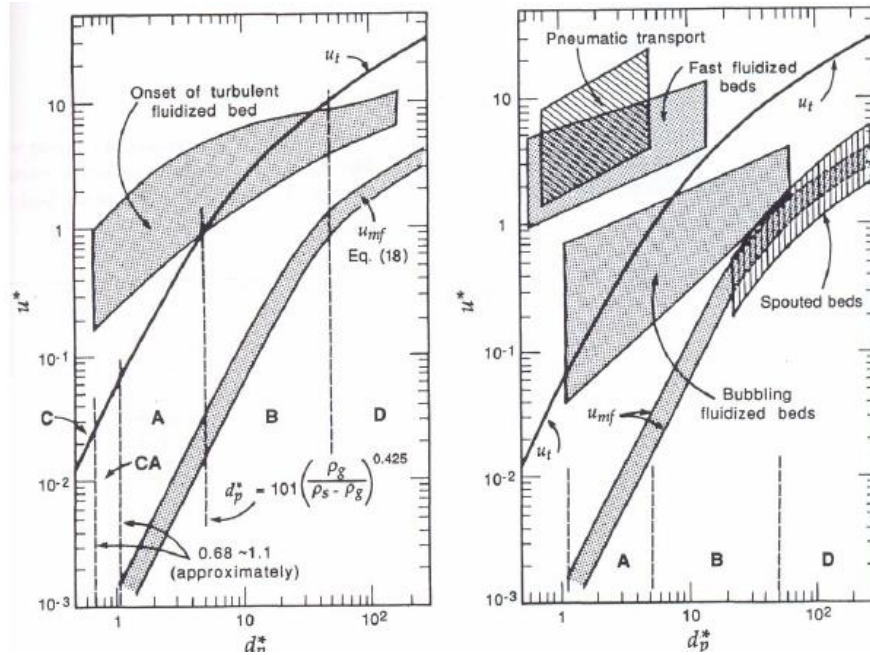


Figura 8. Regímenes de fluidización en lechos fluidizados (Kunii y Levenspiel, 1991).

### 1.9. Velocidad terminal y distribuidor de aire

Para evitar que las partículas sean transportadas por el aire hacia el exterior, es necesario que la velocidad superficial del aire en el secador sea menor que la velocidad terminal de la partícula, es decir,  $U_{mf} < U < U_t$ . La velocidad terminal  $U_t$  puede calcularse a partir de la ecuación (9) en la que  $C_d$  es el coeficiente de arrastre que depende del número de Reynolds.

$$U_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho_g)g}{3\rho_g C_d}} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho_g U_{mf} d_p}{\mu} \quad (10)$$

$$C_d = \frac{24}{Re} \left[ 1 + 0.14142 * Re^{0.559} \right] + \frac{0.4607Re}{Re + 2682.532} \quad (11)$$

### 1.10. Distribuidor de aire

En los sistemas fluidizados es importante que el fluido esté distribuido de manera uniforme en el lecho para producir una fluidización estable. Por ello es necesario que el distribuidor tenga suficientes orificios y no tenga zonas muertas, aunque eventualmente cierto número de orificios en el distribuidor hace que la operación no sea rentable. Geldar (1985) afirma que los distribuidores con orificios circulares menores a 1 mm de diámetro son caros debido a que generan altas caídas de presión en los sistemas fluidizados, teniendo que utilizar compresores de alta potencia. Además, si los orificios superan en 5 veces al diámetro promedio de la partícula, estos pueden ocasionar fuga de las partículas desde el lecho hacia el interior del difusor.

En las tecnologías de lechos fluidizados el distribuidor soporta el peso de las partículas, distribuye el aire de manera homogénea en el lecho y a menudo determina el éxito o fracaso de la operación. El diseño del distribuidor depende de las propiedades de las partículas, del tamaño de orificio, de la distribución de orificios, y de la caída de presión en el lecho ( $\Delta P_b$ ). El diseño del distribuidor tiene influencia en la penetración del chorro (jet), en la generación de zonas muertas, y en el desgaste y mezclado de las partículas (Dabagh, 2005).

La experiencia en distribuidores indica que la caída de presión debe ser menor que la que se observa en el lecho en un porcentaje que va del 20 al 40% de la pérdida de carga en el lecho. En lechos de gran escala la caída de presión en el distribuidor no puede ser menor que 2.5Kpa.

## **CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES**

---

En este capítulo se presenta información sobre estudios de secado en lecho fluidizado, estimación de coeficientes de difusión efectivos, encogimiento volumétrico e hidrodinámica de estos sistemas.

---

El secado de alimentos en lecho fluidizado ha sido estudiado por muchos investigadores que han hecho evaluaciones del contenido de humedad, coeficientes de difusión efectivos, y mediciones de variables hidrodinámicas tales como: caída de presión en el lecho, velocidad superficial, fracción vacía y altura de lecho, en condiciones mínimas de fluidización. En las Tablas 1, 2 y 3, se presentan algunos resultados interesantes de algunos trabajos consultados.

## 2.1 Secado en lecho fluidizado

**Tabla 1.** Investigaciones de secado en lecho fluidizado.

Autores	Resumen
<b>Morales, 2004.</b>	Estudió el secado de papa ( <i>Solanum tuberosum</i> ) en forma de cubos, en un secador de lecho fluidizado (batch) con y sin tiempos de atemperado a temperaturas de 70°C, 80°C y 90°C. El atemperado redujo el tiempo de aireación y el tiempo total del proceso disminuyendo los costos de secado. Reportó que la papa durante el secado presentó disminución en su tamaño y forma.
<b>Simsek et al., 2009.</b>	Estudiaron las características del almidón aislado en 7 variedades de chícharo seco por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB) y encontraron diversas geometrías para los gránulos de almidón (ovaladas, esféricas, elípticas e irregulares) con diámetros desde 26.8 µm a 30.7 µm. Por calorimetría diferencial de barrido (DSC) determinaron valores de 68.4°C-69.9°C para temperatura de transición vítrea, y 10.7 J/g-13.3 J/g para la entalpia de gelatinización.
<b>López, 2003.</b>	Determinó coeficientes de difusión efectivos para chícharo secado en lecho fluidizado (batch) con ciclos de atemperado. Encontró que el atemperado mejoró el secado, y mediante esta técnica obtuvo coeficientes de difusión efectivo entre $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ - $9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , más altos que los reportados en la literatura para chícharo secado sin tiempo de atemperado. Observó que el chícharo disminuyó su diámetro durante el secado en un 18% de su valor inicial.

## 2.2 Encogimiento volumétrico y su efecto en el secado de alimentos

**Tabla 2.** Investigaciones de encogimiento volumétrico en experimentos de secado.

Autores	Resumen
<b>Santacruz et al., 2010.</b>	<p>Estudiaron el secado de uva en lecho fluidizado (batch) a temperaturas de 60°C y 70°C. La velocidad superficial del aire fue 2 m/s, 3 m/s y 4 m/s.</p> <p>El encogimiento volumétrico de la uva se cuantificó en términos de área (<math>A/A_0</math>) proyectada, mediante la técnica de difracción fractal normalizada de contorno (DFNc). A 60°C y 2 m/s la uva presentó un encogimiento volumétrico de 0.58. Los valores de DFNc oscilaron entre 1.116-1.129, y un valor de 1.129 indicó un encogimiento volumétrico máximo.</p>
<b>Telis y Amaral, 2003.</b>	<p>Estudiaron el secado cubos (8 mm) de papa, remolacha azucarera y zanahoria, en lecho fijo a 70°C. El encogimiento volumétrico de los tres alimentos fue no ideal. La fracción vacía en el lecho fijo (<math>\epsilon_m</math>) disminuyó a medida que el tiempo de secado aumentó debido al encogimiento de los alimentos secados y a la disminución de la altura de lecho.</p>
<b>Souraki y Mowla, 2008.</b>	<p>Determinaron coeficientes de difusión efectivos en dirección axial y radial, para geometrías cilíndricas de ejotes verdes (frijol) secados en lecho fluidizado con partículas inertes (2.77 mm de diámetro) de alta conductividad térmica. Las temperaturas de secado fueron 30°C, 40°C y 50°C, y el encogimiento volumétrico que reportaron tuvo un comportamiento lineal con el contenido de humedad. Los coeficientes de difusión efectivos en dirección radial y axial obtenidos están en el intervalo de <math>2.64 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}</math> y <math>4.44 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}</math>. Los coeficientes de difusión efectivos estimados fueron numéricamente menores a los reportados en otros trabajos que no tomaron en cuenta el encogimiento volumétrico.</p>



### 2.3 Hidrodinámica en sistemas de lecho fluidizado

**Tabla 3.** Investigaciones de la hidrodinámica de secadores en lecho fluidizado.

Autores	Resumen
<b>Li et al., 2006.</b>	Estudiaron el secado de chícharo en lecho fluidizado (batch) a 40°C, 60°C, 80°C, 100°C y 110°C. Reportaron un comportamiento lineal entre la velocidad mínima de fluidización y el contenido de humedad del chícharo. Éste disminuyó su diámetro en un 35% en las primeras 4 horas de secado. No reportaron la caída de presión y la altura de lecho durante el secado, sin embargo, sus datos experimentales de velocidad superficial mostraron una reducción del 50%, es decir, el chícharo húmedo fluidizó a 2 m/s, mientras que el chícharo seco fluidizó a 1 m/s.
<b>Bauman et al., 2005.</b>	Estudiaron el secado de uva (14 mm de diámetro), melocotón (5.3 mm de diámetro) y durazno (5.3 mm de diámetro), en lecho fluidizado a 70°C-100°C y velocidades de aire 0.98 m/s-5.2 m/s. Reportaron velocidades superficiales mínimas de fluidización de 5 m/s para uva, 1.8 m/s para melocotón y 2 m/s para durazno. La fracción vacía ( $\epsilon_{mf}$ ) en condiciones mínimas de fluidización para melocotón y durazno fueron 0.62 y 0.60, respectivamente. Los datos experimentales de humedad se ajustaron en un 99.8% al modelo de Page.
<b>Flores, 2009.</b>	Estudió el secado de pimienta gorda (7.5 mm) en lecho fluidizado (batch) con ciclos de atemperado a 60°C, 70°C y 80°C. Encontró que la pimienta disminuye su diámetro en 45% y su densidad aparente en 55%, conservando su forma geométrica (esfera) durante el tiempo de secado. Trabajó una relación altura de lecho a diámetro interno de secador (L/D) de 0.5 y reportó una velocidad superficial mínima de fluidización de 4.75 m/s y 2.65 m/s, y fracción vacía mínima de 0.51 y 0.38, para pimienta fresca y pimienta seca, respectivamente. La pimienta presentó periodo de secado decreciente. Observó que el lecho de pimienta disminuyó su altura durante el secado.

De la revisión bibliográfica se puede decir que durante el secado de diversos alimentos por lecho fluidizado, son pocos los trabajos que cuantifican la velocidad superficial, caída de presión en el secador y altura de lecho, en condiciones mínimas de fluidización. Los resultados experimentales de humedad que se han obtenido mediante el uso de esta tecnología se utilizan para estimar coeficientes de difusión efectivo considerando modelos de difusión, coeficientes de transferencia de masa (para periodo constante de secado), y algunos parámetros de ajustes en modelos empíricos. Pero debido a que los modelos empíricos no ayudan a explicar cómo se remueve la humedad en una matriz sólida, generalmente se utiliza un modelo de difusión para estudiar la migración de la humedad en el interior de la matriz sólida, y esto se ha hecho para un gran número de alimentos que presentan periodo de secado decreciente.

Un fenómeno importante que se ha reportado en diversos trabajos que estudian el secado de alimentos por diferentes métodos, es el encogimiento volumétrico, que consiste en la disminución del tamaño y cambio de la forma del sólido durante el secado. Este fenómeno es un efecto que resulta de la rapidez de secado y condiciones de operación del secador, y diversos investigadores han tratado de relacionar este fenómeno con el contenido de humedad, a partir de expresiones empíricas y fundamentales (haciendo uso de la porosidad del lecho, diámetro, y densidad del sólido).

Dentro de la información correspondiente a la hidrodinámica de secadores de lecho fluidizado, la velocidad superficial del aire en condiciones mínimas de fluidización, es quizá la variable más estudiada en diversos trabajos que hacen uso de esta tecnología, no así la altura del lecho, fracción vacía y la caída de presión en el secador. Por lo que en este trabajo se pretende estudiar el efecto que el encogimiento volumétrico podría tener en la hidrodinámica de un secador de lecho fluidizado de chícharo, pues como ya se mencionó este fenómeno está directamente relacionado con el tamaño y forma del sólido, parámetros importantes en la hidrodinámica de este tipo de tecnología.

## **CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

---

En este capítulo se plantea la problemática a resolver, hipótesis a validar, objetivos propuestos y la justificación del trabajo.

---

### **3.1 Planteamiento del problema**

En el secado de diversos alimentos con alto contenido en fibra se ha observado cambios en su forma geométrica y propiedades físicas (densidad aparente, densidad empacada). Estos cambios forman parte de un fenómeno conocido como encogimiento volumétrico que podría afectar el comportamiento hidrodinámico del secador, es decir, alterar la velocidad superficial del aire, caída de presión en el secador y altura de lecho, en condiciones mínimas de fluidización. De existir un efecto en la hidrodinámica del secador, el conocimiento de ésta permitirá evaluar propiedades que sean de utilidad para reproducir de mejor manera los perfiles de humedad y temperatura en el lecho. A demás, la comprensión de la hidrodinámica del secador ayudará a diseñar, optimizar, proponer un lazo de control para el secador y calcular los insumos energéticos necesarios para el secado de sólidos que presenten este fenómeno.

Por lo tanto, en este trabajo se utilizará chícharo (*Pisum sativum*) como sólido modelo debido a que presenta el fenómeno de encogimiento, y también porque tiene la ventaja que durante el secado conserva su forma geométrica (casi esférica).

### **3.2 Hipótesis**

El encogimiento volumétrico del chícharo afecta la hidrodinámica de un secador de lecho fluidizado.

### **3.3 Objetivos**

#### **3.3.1 General**

Estudiar el encogimiento volumétrico del chícharo secado en lecho fluidizado y su relación con la hidrodinámica del secador.

#### **3.3.2 Específicos**

- Determinar la velocidad superficial, caída de presión en el secador y altura de lecho en condiciones mínimas de fluidización, para chícharo en el transcurso del secado. Tomando como base el chícharo fresco.

- Determinar la densidad aparente, densidad empacada y diámetro promedio de partícula, para chícharo en el transcurso del secado. Tomando como base el chícharo fresco.
- Evaluar el efecto de la temperatura de alimentación del aire y relación altura a diámetro interno del secador, en el comportamiento hidrodinámico del secador y sobre la cinética de secado.
- Medir la temperatura en el interior del lecho durante el tiempo de secado.
- Calcular teóricamente la velocidad mínima de fluidización del chícharo durante el secado.
- Calcular coeficientes de difusión efectivos y energía de activación.

### **3.4 Justificación**

El secado de chícharo es una operación compleja por naturaleza debido a que la pérdida de agua modifica su estructura celular y propiedades físicas, provocando que la pared celular y la red almidón-proteína se vea alterada al incrementar la temperatura del aire de secado, originando así el encogimiento volumétrico (García, 2012).

El encogimiento volumétrico afecta el diámetro de partícula, lo que permite especular que la hidrodinámica del secador se verá afectada durante el secado, pues ésta dependen del diámetro de partícula, densidad aparente y propiedades físicas del aire de secado.

El cálculo de los coeficientes de difusión efectivos tomando en cuenta el fenómeno de encogimiento volumétrico podría mejorar la estimación teórica de las curvas de secado, y el conocimiento del comportamiento hidrodinámico de los secadores con partículas que presentan encogimiento volumétrico, será útil en el cálculo de los insumos energéticos del secador, así como en el diseño, optimización y control de este tipo de tecnologías.

Por lo anterior, y dada la importancia de conservar los chícharos por sus beneficios a la salud, se justifica el secado de chícharo y el estudio de la hidrodinámica del secador en lecho fluidizado.

## **CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA**

---

En este capítulo se presenta la metodología experimental y modelos teóricos utilizados.

---

## **4.1 Materiales y métodos**

### **4.1.1 Materia prima**

En este estudio se utilizó chícharo (*Pisum sativum*), el cual se compró en vaina en la Central de Abastos del Distrito Federal. El chícharo se desenvainó y se separó por tamaño utilizando tres tamices cuadrados con orificios circulares de diámetro 0.0087 m, 0.008 m y 0.0075m. Después, se almacenó en bolsas herméticas (Ziploc) y se refrigeró a una temperatura de 5°C durante 24 horas para homogenizar su contenido de humedad (Honavar et al., 2013).

### **4.1.2 Instrumentos de medición y material de vidrio**

- Parrilla eléctrica Thermolyne type 1000 Stir Plate, modelo SPA1025B (Thermolyne Corporation, USA).
- Analizador de Humedad Ohaus, modelo MB45 (Ohaus, Suiza).
- Balanza Analítica OHAUS, Modelo PA1502 (Ohaus, Suiza).
- Horno de circulación forzada, Modelo HCF-48 (RSU Labsupply, Monterrey).
- Anemómetro DAFM3, Modelo EUi (Test Instruments, Canada).
- Compresor de aire, HANKISON, 40 Hp, modelo D-462-SB, 1760 rpm, 235kg, con control automático de 220 v.
- Tanque cilíndrico para almacenamiento de aire ALANSA, presión 12 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>, diámetro interno de 752.5 mm, espesor de 4.76 mm, y masa total de 263 kg.
- Columnas de secado regenerativo con alúmina activada, HANKISON Internacional, modelo DH-165, flujo de aire 166.5 pies<sup>3</sup> estándar por minuto, 100 psig y 60°F.
- Termopares tipo k, diámetro 3/16" y 84 mm de longitud (Recisa, México).
- Data logger portátil con pantalla LCD para registrar temperatura en el intervalo de -35 a 80 °C (+/- 0.5 °C), modelo U-502LCD (J.M. Industrial technology, México).
- Medidor de flujo de aire a 1 atm y 68 °F, Flow cell.
- Manómetros graduados DE-WIT, 0-120 psia.
- Cronómetro, CASIO.
- Cuchillos y pinzas de acero inoxidable.
- Vernier Digital 150 mm x 6 pulgadas, marca Caliper.

- Probeta de 500 mL, Pyrex.
- Vidrio de reloj, Pyrex.
- Manómetro en forma de “U” elaborado con manguera transparente de pared rígida 3/8” de diámetro interno.
- Tamices de madera (0.25 m x 0.25 m) con perforaciones circulares de 0.0087 m y 0.008 m y 0.0075 m.
- Agua destilada.

#### **4.1.3 Equipo experimental.**

El secador utilizado consiste en una columna cilíndrica de acrílico de 0.095 m de diámetro interno y 0.90 m de altura. El distribuidor del secador tiene un diámetro externo de 0.092 m y 85 orificios circulares de 0.002 m de diámetro interno, distribuidos en arreglo triangular (Pitch=10 mm) que representa un total de 3.76 % de área libre. El aire utilizado para secar se alimentó desde un compresor externo HANKISON que cuenta con dos columnas con alúmina activada para retener la humedad del aire de descarga del compresor. El aire llega al laboratorio a través de una tubería de acero al carbón de 0.0508 m de diámetro interno, y se regula con una válvula de aguja; después se distribuye a través de una tubería de acero inoxidable con 0.0762 m de diámetro interno que lo transporta hacía el secador, pasando antes por un sección de calentamiento compuesta por 8 resistencias eléctricas tipo abrazaderas de 2.50 kW cada una. Mediante un panel de control automático se controlan las resistencias eléctricas que calientan el aire de secado que se alimenta al secador, el cual tiene una válvula que permite regular el flujo de aire alimentado que se cuantifica con un rotámetro FLOW CELL (0-25 pie<sup>3</sup> SCFM) ubicado sobre la tubería, antes de la sección de calentamiento. El secador es desmontable y este se ajusta a través una Té con rosca de 0.0762 m de diámetro interno que forma parte de la tubería que transporta el aire de secado (Figura 9).

La Figura 10 presenta de manera más detalla los puntos de mediciones de las variables correspondientes a la hidrodinámica del secador, que cuenta con 6 orificios cónicos de 12mm de diámetro interno. Un orificio está ubicado en el difusor y tiene un termopar que mide la temperatura del aire en la entrada del secador, éste está conectado al control automático que controla las resistencias eléctricas y temperatura del aire de secado (**T**).

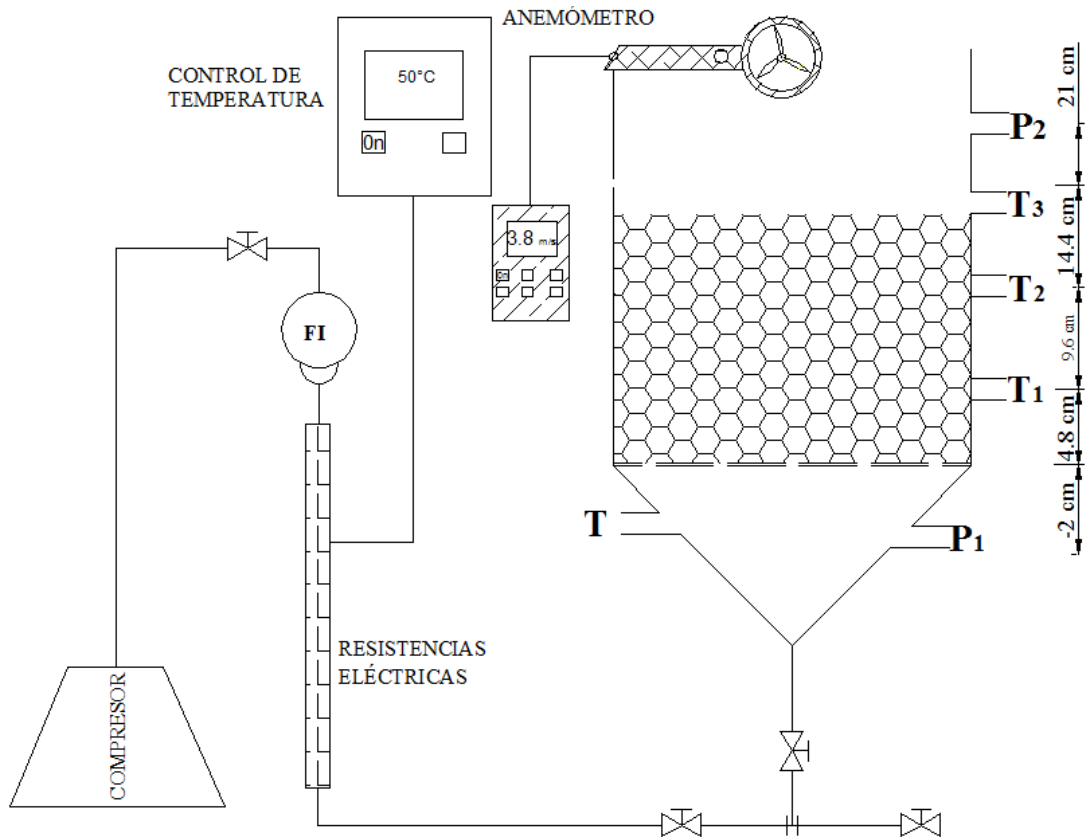




**Figura 9.** Equipo de secado utilizado en la parte experimental.

Tres orificios adicionales están ubicados a 4.8 cm, 9.6 cm y 14.4 cm de altura con respecto al distribuidor, en estos orificios se conectaron termopares que registraron la temperatura del lecho de manera continua en memorias *Data Logger*. Los termopares colocados se identificaron como  $T_1$ ,  $T_2$ , y  $T_3$ , y registraron la temperatura del lecho cercana al distribuidor, la temperatura en el centro de lecho, y la temperatura en la parte superior de lecho, respectivamente.

Los dos orificios ( $P_1$  y  $P_2$ ) adicionales están conectados a un manómetro en forma de U sujeto a una tabla de madera de 1.5 m x 2.5 m, forrada con papel milimétrico para medir el desplazamiento de agua en el manómetro. El secador está aislado con caucho vulcanizado (color café) para evitar pérdidas de calor por las paredes del secador con el medio ambiente.



**Figura 10.** Equipo de secado utilizado en la parte experimental.

## 4.2 Caracterización física del chicharo fresco

Transcurrido 24 horas de refrigeración se tomaron muestra de chicharo fresco y se determinó lo siguiente:

### 4.2.1 Diámetro de partícula

Se tomaron 20 chicharos frescos tamizados y con el Vernier electrónico se determinó su diámetro. El diámetro de partícula experimental reportado fue el promedió aritmético de las mediciones realizadas y se determinó a partir de la ecuación (12).

$$d_p = \frac{\sum_{i=1}^{20} d_{pi}}{20} \quad (12)$$

#### 4.2.2 Determinación de la densidad empacada

La densidad empacada representa la relación de la masa de partículas contenidas en una unidad de volumen de referencia que involucra el volumen vacío entre las partículas empacadas. Para el caso del chícharo se colocó sobre la balanza analítica una probeta de 500 mL, la balanza se taró, y la probeta se llenó con chícharo fresco hasta su volumen de graduación. La masa indicada en la balanza analítica se registró como  $w_1$ . La densidad empacada ( $\rho_e$ ) en  $\text{kg/m}^3$  se determinó a partir de la ecuación (13).

$$\rho_e = \frac{w_1}{500} \times 1000 \quad (13)$$

#### 4.2.3 Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente representa la relación de la masa de partículas contenidas en una unidad de volumen de referencia menos el volumen vacío entre las partículas empacadas. Para el caso del chícharo se colocó sobre la balanza analítica una probeta de 500 mL, la balanza se taró, y la probeta se llenó con chícharo fresco hasta su volumen de graduación. La masa indicada en la balanza analítica se registró como  $w_1$ . Después se agregó agua destilada en la probeta hasta la línea de foro. El volumen de agua destilada agregado se registró como  $V_v$ . La densidad aparente ( $\rho_p$ ) en  $\text{kg/m}^3$  se determinó a partir de la ecuación (14).

$$\rho_p = \frac{w_1}{500 - V_v} \times 1000 \quad (14)$$

#### 4.2.4 Determinación de la masa seca

El contenido de masa seca contenida en una muestra de chícharo húmedo se determinó en un horno de convección forzada marca *RSU* modelo *HFC-48*. Para ello se pesaron por triplicado en un platillo de aluminio 5 gramos de chícharo escaldado. Las muestras se metieron en el horno por 24 horas a una temperatura de  $105^\circ\text{C}$ . La masa de chícharo que queda después de las 24 horas se conoce como masa seca ( $m_{ss}$ ) (AOAC, 1990).

#### 4.2.5 Determinación del contenido de humedad en base seca

Se pesó por triplicado en un platillo de aluminio aproximadamente 5 gramos de chícharo, y se introdujeron en el horno de convección forzada durante 24 horas a 105°C. La humedad en base seca (kg de agua/kg de ss) se determinó a partir de la ecuación (15).

$$X = \frac{m - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (15)$$

#### 4.3 Arranque y operación del equipo experimental

La masa de chícharo necesaria para cada experimento se determinó a partir de la ecuación (16) que hace uso de la relación L/D estudiada, y después esta masa se pesó en la balanza y se escaldó para incrementar su permeabilidad y mejorar las características finales del chícharo al término el secado. El escaldado se realizó a partir de un tratamiento térmico con agua a temperatura de ebullición durante 2 minutos (Camarena y mercado, 2007) y luego se enfrió súbitamente con agua a temperatura ambiente.

$$m = \frac{\pi D^3}{4} \left( \frac{L}{D} \right) \rho_e \quad (16)$$

##### 4.3.1 Determinación de la caída de presión en el distribuidor y lecho de chícharo

El secador es instalado, y en la parte superior de la cámara de secado se coloca el anemómetro para medir la velocidad superficial del aire, también se instalan los termopares y las líneas correspondientes al manómetro en forma de U. Se abre la válvula de aguja y se ajusta la presión a 60 Psig para permitir paso al aire proveniente del compresor. La temperatura del aire de secado se programa en el panel de control, y el aire se distribuye a través la tubería que cuenta con una sección de resistencias eléctricas que aumentan su temperatura antes de alimentarse al secador.

Después se abre la válvula ubicada en la base del difusor del secador y se deja pasar un flujo de aire de secado de 15.5 SCFM con la finalidad de estabilizar más rápido la temperatura de operación establecida en el panel de control. Una vez alcanzada la temperatura de operación, se cierra la válvula de alimentación de aire, y después se abre

gradualmente para permitir el flujo de aire a través del secador (vacío) y medir su velocidad superficial (desde 0.5 m/s a 5 m/s), en este momento se toman lecturas en el rotámetro, y se miden los desplazamientos de agua en el manómetro en U para evaluar la caída de presión debida al distribuidor, pues el secador no contiene masa de chicharo.

Después se cierra la válvula ubicada en la base del difusor y rápidamente se carga la masa escaldada de chicharo. Luego, gradualmente se abre esta válvula para permitir el flujo de aire a través del secador, y se realizan mediciones de velocidad superficial (desde 0.5 m/s a 5 m/s), también se toman lecturas en el rotámetro y se miden desplazamientos de agua en el manómetro en U para evaluar la caída de presión total (debida a la altura de lecho y al distribuidor) en el secador. La caída de presión correspondiente al lecho de chicharos es la diferencia entre la caída de presión total (distribuidor + lecho) y la caída de presión en el distribuidor.

Este procedimiento se realizó únicamente para el chicharo fresco a una relación L/D y los datos obtenidos se representaron en un gráfico de  $\ln(U)$  vs  $\Delta P_b$ , para determinar la velocidad superficial mínima de fluidización.

#### **4.3.2 Determinación de las propiedades hidrodinámicas durante el secado**

El secador es instalado, y en la parte superior de la cámara de secado se coloca el anemómetro para medir la velocidad superficial del aire, también se instalan los termopares y las líneas correspondientes al manómetro en forma de U. Se abre la válvula de aguja y se ajusta la presión a 60 Psig para permitir paso al flujo de aire proveniente del compresor. La temperatura del aire de secado se programa en el panel de control y el aire se distribuye a través la tubería que cuenta con una sección de resistencias eléctricas que aumentan su temperatura antes de alimentarse al secador.

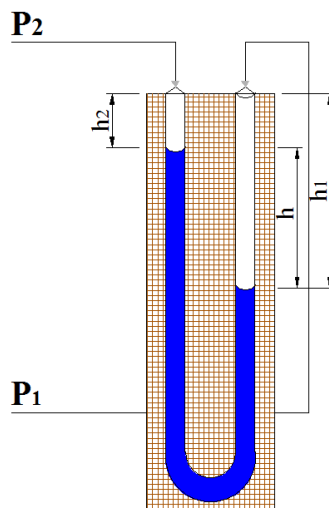
Después se abre la válvula ubicada en la base del difusor del secador y se deja pasar un flujo de aire de secado de 15.5 SCFM con la finalidad de estabilizar más rápido la temperatura de operación establecida en el panel de control. Una vez alcanzada la temperatura de operación, se cierra la válvula de alimentación de aire, y rápidamente se carga la masa escaldada de chicharo según la relación L/D estudiada. Se activan las memorias para registro de las temperaturas de lecho y se abre gradualmente la válvula para

permitir el flujo de aire a través del secador hasta alcanzar la velocidad superficial mínima de fluidización. Este valor de velocidad mínima de fluidización se asignó al tiempo  $t=0$ , y se mantuvo constante durante los 180 minutos de secado en los que se detuvo la operación del secador (aproximadamente 1 minuto) cada 30 minutos para hacer mediciones de caída de presión total en el secador, altura de lecho y velocidad superficial del aire, en las condiciones mínimas de fluidización tal y como se describen en el punto 4.4.

#### 4.4 Caracterización hidrodinámica del secado de chícharo

##### 4.4.1 Determinación de la caída de presión de presión en el lecho a condiciones mínimas de fluidización

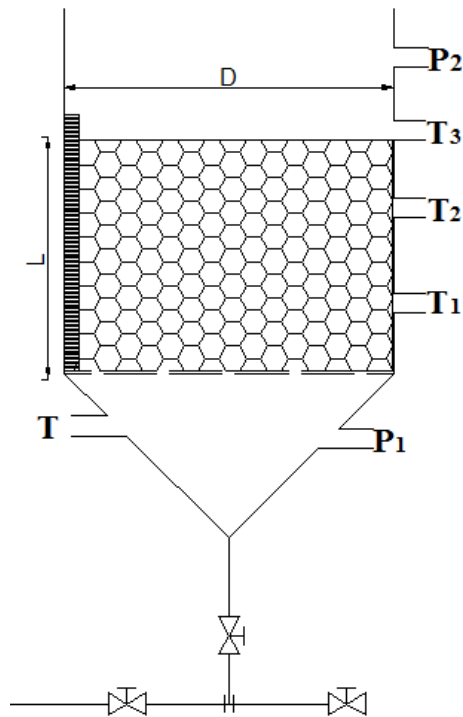
En el momento que se cargó la masa escaldada de chícharo, se abrió lentamente la válvula ubicada en la base del difusor hasta llegar a la velocidad superficial mínima de fluidización que se alcanzó al tiempo  $t=0$  cuando se observó movimiento (semejante al de un líquido en ebullición) en la parte superior del lecho de chícharo. En este instante se anotaron las alturas de los niveles de agua en el manómetro ( $h_1$  y  $h_2$ ) y la altura  $h$  (diferencia entre  $h_1$  y  $h_2$ ) se reportó en metros de agua. Esta medición se realizó lo más rápido posible, pues una vez alcanzadas las condiciones mínimas de fluidización, se observan oscilaciones en el fluido manométrico que dificultan la medición.



**Figura 11.** Manómetro en forma de “U” para determinar caída de presión.

#### 4.4.2 Determinación de la altura de lecho y velocidad mínima de fluidización

La altura mínima de fluidización se determinó haciendo uso de una pieza de papel milimétrico (0.03 m x 0.6 m) adherida en la pared interna del secador, tomando como referencia el nivel del distribuidor. La altura del lecho en condiciones mínimas de fluidización se determinó en el momento que se observó movimiento (semejante al de un líquido en ebullición) en la parte superior del lecho. En este instante también se tomaron lecturas del anemómetro para cuantificar la velocidad superficial del aire.



**Figura 12.** Medición de velocidad y altura de lecho en condiciones mínimas de fluidización.

#### 4.4.3 Determinación de la fracción vacía de lecho a fluidización mínima

La fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización no fue posible cuantificarla en línea, sin embargo, se estimó a partir de la ecuación 6, que hace uso del contenido de humedad y de la altura de lecho mínima de fluidización.

## 4.5 Secado de chícharo

El secado se realizó siguiendo el procedimiento que se describe el punto 4.3.2, pero en este caso no se midieron las propiedades hidrodinámicas, tampoco se activaron las memorias para el registro de temperaturas de lecho. Sin embargo, en esta operación el secador se detuvo (aproximadamente 1 minuto) cada 30 minutos y con ayuda de un accesorio semejante a un cucharón se tomó una muestra de chícharo de aproximadamente 5 gramos, con la cual se determinó el diámetro promedio de partícula del chícharo siguiendo la metodología descrita en el punto 4.2.1. Y también se determinó lo siguiente:

### 4.5.1 Determinación de la densidad aparente del chícharo durante el secado

De la muestra de chícharo obtenida del secador se tomaron 10 chícharos, y a cada uno se le determinó su masa ( $m_i$ ) y diámetro de partícula ( $d_{pi}$ ). La densidad aparente individual ( $\rho_{pi}$ ) de cada chícharo se obtuvo partir de la ecuación (17) que representa la relación de su masa y su volumen calculado considerando que es una esfera. La densidad aparente experimental reportada fue el promedio aritmético de las 10 densidades individuales.

$$\rho_{pi} = \frac{m_i}{\frac{\pi(d_p)^3}{6}} \quad (17)$$

### 4.5.2 Determinación del encogimiento volumétrico

El encogimiento volumétrico del chícharo se determinó a partir de los resultados de diámetro de partícula obtenidos en los puntos 4.2.1 para el chícharo, durante el tiempo de secado. Este parámetro se evaluó con la ecuación (18), en la que se considera que el chícharo es totalmente esférico.

$$S_b = \frac{V}{V_0} = \left( \frac{d_p}{d_{p0}} \right)^3 \quad (18)$$

### 4.5.3 Determinación de las curvas de secado

Una vez realizados los procedimientos 4.5.1 y 4.5.2, la muestra total del chícharo se dividió en 3 muestras de 1.5 gramos cada una, y con la metodología descrita en el punto 4.2.5 se determinó el contenido de humedad del chícharo. Esto se realizó en todos los experimentos



a las 3 temperaturas del aire de secado y las 3 relaciones L/D de estudio. Las curvas de secado se construyeron a partir de los datos de humedad en base seca y tiempo de secado.

#### **4.5.4 Determinación de la actividad de agua**

Al trascurrir los 180 minutos de secado, se tomaron por triplicado, muestras de chícharo de aproximadamente 1.5 gramos cada una. Cada muestra por separado se colocó en el medidor de actividad de agua *AquaLab Lite* que cuenta con una interfaz electrónica y que indica a través de un display el valor correspondiente de este parámetro. Cada medición tuvo una duración de 4 minutos y el valor experimental reportado fue el promedio aritmético de las 3 mediciones.

#### **4.6 Diseño experimental**

Para estudiar el efecto de la temperatura del aire de secado y la relación L/D en la hidrodinámica y en el secado de chícharo, se realizaron dos bloques factoriales  $3^2$  con 2 repeticiones en el punto central. El primero, está enfocado al estudio de la hidrodinámica del secador, y el segundo está orientado al secado de chícharo, en este último se trata de relacionar los resultados del primer diseño con las curvas de secado, encogimiento volumétrico y densidad aparente.

La razón por la que se propusieron 2 diseños experimentales es que durante el estudio de la hidrodinámica del secador, éste puede ser perturbado con el muestreo (que es necesario para determinar diámetro, densidad aparente y humedad), lo que podría llevar a cuestionar los resultados hidrodinámicos ya podrían depender del muestreo constante de masa del secador.

Las variables fijas de operación fueron: la velocidad superficial del aire ( $\approx 4.1$  m/s) obtenida para chícharo fresco en condiciones mínimas de fluidización al tiempo  $t=0$ , la presión en la línea de alimentación de aire (60 Psi) y el tiempo de secado de 180 minutos.

#### 4.6.1 Diseño experimental para estudio hidrodinámico del secador

Los niveles correspondientes a cada factor en este diseño experimental se muestran en la Tabla 4, las variables de respuesta fueron: la velocidad superficial del aire, la caída de presión total y la altura de lecho en condiciones mínimas de fluidización, que se midieron cada 30 minutos (ver punto 4.4).

**Tabla 4.** Diseño experimental para el estudio hidrodinámico del secador.

<b>Factor</b>	<b>Nivel inferior</b>	<b>Nivel medio</b>	<b>Nivel superior</b>
Temperatura del aire de secado, °C	50	60	70
Relación L/D	0.5	1.0	1.5

Los resultados obtenidos para estas variables de respuesta se representaron como las relaciones de los valores correspondientes para el chícharo en el transcurso de secado respecto a los valores obtenidos para el chícharo fresco a  $t=0$ , es decir,  $\Delta P_{mf}(t)/\Delta P_{mf}(t=0)$ ,  $U_{mf}(t)/U_{mf}(t=0)$  y  $h_{mf}(t)/h_{mf}(t=0)$ .

#### 4.6.2 Diseño experimental para estudio de secado

Para el secado de chícharo se estudiaron los mismos factores presentados en la Tabla 4, pero en este caso las variables de respuesta fueron: la humedad en base seca, la densidad aparente y el diámetro promedio de partícula, para el chícharo en el transcurso de secado. Para ello se tomaron muestras del secador y se realizó lo descrito en los puntos 4.2.1, 4.5.1 y 4.5.3.

### 4.7 Modelos matemáticos

#### 4.7.1 Cálculo teórico de la velocidad mínima de fluidización

La velocidad mínima de fluidización ( $U_{mf}$ ) es uno de los parámetros más importantes en un sistema fluidizado, y puede determinarse teóricamente a partir de la ecuación (19) que se

obtiene de igualar la ecuación propuesta por Ergun para la caída de presión en un lecho fijo y la ecuación resultante del peso de las partículas con la fuerza de corte que ejerce el gas en movimiento ascendente (Kunii y Levenspiel ,1991).

$$\frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu U_{mf}}{(\varepsilon_{mf})^3 (\phi dp)^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_{mf}) U_{mf}^2}{(\varepsilon_{mf})^3 \phi dp} = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (19)$$

En la ecuación (19) se observa que la  $U_{mf}$  depende del diametro de partícula ( $d_p$ ), de la densidad de partícula( $\rho_p$ ), de la fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización ( $\varepsilon_{mf}$ ) y de las propiedades físicas del fluido ( $\mu, \rho_g$ ). La deducción de esta ecuación se muestra en el Apéndice A.

Sustituyendo el diámetro de partícula de la ecuación (18) en la ecuación (19), se obtiene la ecuación (20), que describe la velocidad mínima de fluidización en términos del encogimiento volumétrico.

$$\frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu U_{mf}}{(\varepsilon_{mf})^3 (\phi S_b^{1/3} dp_0)^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_{mf}) U_{mf}^2}{(\varepsilon_{mf})^3 \phi S_b^{1/3} dp_0} = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (20)$$

Las ecuaciones (19) y (20) no consideran los efectos de pared, es decir, la distribución (arreglo) de las partículas vecinas a la pared en la cámara de fluidización. Tales efectos, dependen de la relación diámetro de secador a diámetro de partícula ( $D/d_p$ ) que a su vez se relacionan con la fracción vacía del lecho, es decir, con partículas pequeñas  $D/d_p$  es un número grande y la fracción vacía en el interior de lecho será pequeña ( $\approx 0.40$ ), por el contrario si las partículas son grandes  $D/d_p$  es menor y la fracción vacía en el interior de lecho será mayor a 0.40 (Klerk, 2003). Los efectos de pared se han estudiado en muchos trabajos, mismos, que concluyen que a relaciones  $D/d_p > 50$  los efectos de pared pueden no ser importantes (Montillet, Akkari y Comiti, 2007).

En régimen laminar ( $Re < 100$ ) la caída de presión en el secador incrementa debido a la fricción adicional de la pared que es predominante en comparación con el incremento de la porosidad. Por otro lado a régimen turbulento ( $Re > 1000$ ) la caída de presión en el secador disminuye porque la fracción vacía incrementa en la vecindad de la pared. En otras

palabras el efecto de pared es función del número de Reynolds (Eisfeld y Schnitzlein, 2001).

Una propuesta para tomar en cuenta los efectos de pared en la fluidización fue reportada por Metha y Hawley (1969), quienes estudiaron los efectos de pared en lechos de partículas de diferentes geometrías. Su propuesta está basada en la definición de un radio hidráulico de flujo para el aire y tales efectos de pared en su ecuación forman parte del termino M que se presenta en la ecuación (21) (Apéndice A).

$$\frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu U_{mf}}{(\varepsilon_{mf})^3 (\phi \cdot dp)^2} M^2 + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_{mf}) U_{mf}^2}{(\varepsilon_{mf})^3 \phi \cdot dp} M = (1-\varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g \quad (21)$$

#### 4.7.2 Modelo para las curvas de secado

El conocimiento de la cinética de secado es importante en el diseño, simulación y optimización de procesos de secado. Diversos trabajos de secado generalmente consideran cinética de primer orden (Lewis, 1921) para representar los datos experimentales de humedad. A partir de esta cinética se han desarrollado un gran número de expresiones matemáticas entre las cuales se pueden mencionar: la ecuación de Page, la ecuación de Newton, y la ecuación Henderson-Pabis, que también predicen el perfil de humedad en alimentos pero lamentablemente son ecuaciones que tienen parámetros de ajustes que no permiten explicar fenómenos internos de secado (Page, 1949; Lewis, 1921; Henderson y Pabis, 1961).

En este trabajo se utiliza la ecuación (22) para estimar los perfiles experimentales de humedad y evaluar las constantes de velocidad de secado a las temperaturas de estudio y con ello obtener la energía de activación considerando un modelo tipo Arrhenius descrito por la ecuación (23). La ecuación (22) en este trabajo se conoce como *modelo exponencial* y su deducción correspondiente se encuentra en el Apéndice B<sub>1</sub>.

$$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \exp(-kt) \quad (22)$$

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (23)$$

Las ecuaciones de transporte de masa son modelos matemáticos que predicen los perfiles de humedad y proporcionan coeficientes de difusión efectivos de la humedad en los alimentos, por ello en este trabajo se plantean dos modelos, uno que toman en cuenta el encogimiento volumétrico de chícharo y otro que lo considera despreciable.

Mediante un balance de humedad (Apéndice B<sub>2</sub>) en dirección radial para una partícula de geometría esférica, y considerando válida la ley de Fick se obtiene la ecuación (24) en donde  $D_{ef}$  es el coeficiente de difusión efectivo que engloba los diferentes mecanismos de transporte de la humedad líquida en el interior de la partícula sólida (ver punto 1.3).

$$\frac{\partial(\rho_s X)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 D_{ef} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_s X) \right\} \quad (24)$$

Si consideramos que las propiedades físicas (diámetro y densidad volumétrica) del chícharo permanecen constantes, que el coeficiente de difusión efectivo es constante, que los efectos internos y externos de transporte de calor son nulos, y la no existencia de estado estacionario térmico inicial, la solución analítica de la ecuación (24) para el transporte de humedad en dirección radial sujeta a las condiciones de frontera del Apéndice B<sub>2</sub>, está dada por la ecuación (25) que denominaremos *modelo sin encogimiento*.

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{R_p^2}\right) \quad (25)$$

La ecuación (25) es una ecuación que se aplica cuando los sólidos no presentan el fenómeno de encogimiento volumétrico.

Partiendo de la ecuación (24), Park (1998) propuso una metodología (Apéndice B<sub>3</sub>) que consiste en expresar la ecuación de difusión en términos del volumen de la partícula. En el presente trabajo se adaptó esta metodología para obtener una ecuación en función del encogimiento volumétrico, en la que consideramos que el coeficiente de difusión efectivo es constante, para obtener la ecuación (26) que conoceremos como *modelo con encogimiento*.

$$\frac{Z - Ze}{Z_0 - Ze} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2 De_f t}{R^2}\right) \quad (26)$$

$$\text{En donde } Z = \frac{X}{S_b}, Z_0 = \frac{X_0}{S_{b0}} \text{ y } Ze = \frac{X_e}{S_{be}}$$

La humedad de equilibrio ( $X_e$ ) se determinó con la ecuación (27) reportada por Medeiros y Sereno (1994), en la que se hace uso de la actividad de agua en la superficie del chícharo medida durante el transcurso del secado.

$$X_e = \frac{0.0694a_w}{(1 - 0.954a_w)(1 + 0.39114a_w)} \quad (27)$$

### 4.7.3 Modelos para los perfiles de temperatura de lecho

#### 4.7.3.1 Modelo homogéneo

Zahed y Epstein (1992) reportaron un modelo para secadores de lecho fluidizado operados en Spout bed, en el que las ecuaciones (28) y (29) representa el balance de materia y energía. A diferencia de Zahed y Epstein (1992), quienes consideraron efectos externos de transporte de masa y coeficiente de difusión efectivo dependiente de la temperatura de secado y del contenido de humedad, en este trabajo, se considera que el coeficiente de difusión efectivo es constante y que no existen resistencias externas al de transporte de masa. Para detalles del balance de masa y energía ver el Apéndice C<sub>1</sub>. El modelo homogéneo propuesto por Zahed y Estein (1992) ha presentado desviaciones del 8% en la predicción de temperatura del lecho para el secado de arroz en lecho fluidizado batch.

$$\dot{m}_A (Y - Y_1) = -m_B \frac{dX}{dt} \quad (28)$$

$$m_B (C_B + XC_w) \frac{dT_l}{dt} = \dot{m}_A (C_A + Y_1 C_v) (T_1 - T_l) - \Delta H_{evap} \dot{m}_A (Y - Y_1) \quad (29)$$

**Sujetas a las condiciones iniciales de temperatura y contenido de humedad**

$$t = 0 \quad T_l = T_0 \quad X = X_0$$

#### 4.7.3.2 Modelo hidrodinámico

El modelo homogéneo no considera las variables hidrodinámicas del sistema fluidizado, por ello en este trabajo se trató obtener el contenido de humedad y su correspondiente derivada respecto al tiempo, en términos de la densidad aparente, fracción vacía y altura de lecho, en condiciones mínimas de fluidización, las cuales se midieron en la parte experimental. Para ello se realizó el procedimiento del Apéndice C<sub>2</sub> con el cual se obtuvo la ecuación (30). Esta ecuación depende de las variables hidrodinámicas antes mencionadas y de sus respectivas derivadas. Estas últimas pueden evaluarse numéricamente o ajustarse a expresiones exponenciales tal y como se hizo en este trabajo, en el que se emplearon ecuaciones de 5 parámetros en el software Origin 8 (Tabla C<sub>21</sub> del Apéndice C<sub>21</sub>).

$$\frac{dX}{dt} = \left[ h_{mf} \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \frac{d\rho_p}{dt} - h_{mf} \cdot \rho_p \frac{d\varepsilon_{mf}}{dt} + d\rho_p \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot \frac{dh_{mf}}{dt} \right] \left( \frac{A}{m_B} \right) \quad (30)$$

Las ecuaciones C<sub>23</sub> (Apéndice C), (29) y (30) integran lo que denominaremos *modelo hidrodinámico* debido a que hace uso de las variables hidrodinámicas.

#### 4.8 Relación entre los modelos de las curvas de secado y temperatura de lecho

Las curvas experimentales de secado se reprodujeron a partir de tres modelos, y la temperatura de lecho con dos modelos. Los modelos para estimar las curvas de secado y temperatura de lecho tienen en común el contenido de humedad del chícharo y la humedad del aire a la salida del secador. Por ello en la Tabla 5, se muestran las combinaciones de modelos y sus respectivas ecuaciones a resolver, así como los nombres con los cuales se identificarán en este trabajo.

**Tabla 5.** Combinaciones de los modelos para perfiles de humedad y temperatura de lecho.

<b>Combinación</b>	<b>Ecuaciones a resolver</b>	<b>Nombre de la combinación</b>
1	22, 28 y 29	Homogéneo-exponencial
2	25, 28 y 29	Homogéneo-sin encogimiento
3	26, 28 y 29	Homogéneo-con encogimiento
4	C <sub>23</sub> (Apéndice C) , 28, 29 y 30	Hidrodinámico

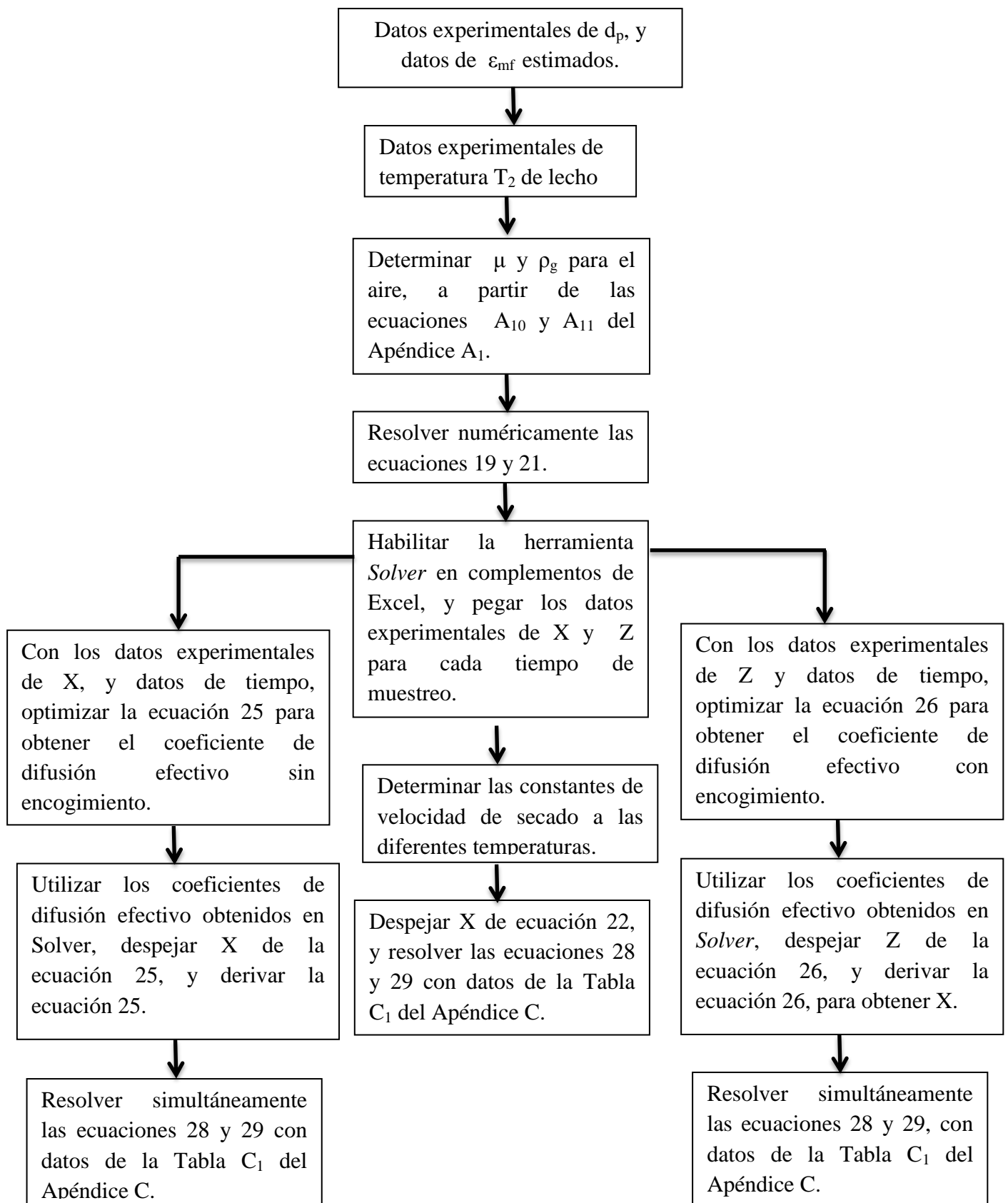
#### **4.9 Metodología para la solución numérica**

Las propiedades del aire se calcularon a partir temperatura  $T_2$  obtenida en el lecho fluidizado, y los datos de diámetro de partícula y fracción vacía se alimentaron al programa a través de un archivo de texto. Las ecuaciones (19) y (21) se resolvieron numéricamente utilizando el compilador *Silver Frost Plato* FORTRAN 95 por el método de bisección, con una tolerancia de  $1 \times 10^{-4}$  para el criterio de la raíz, en el intervalo de velocidad mínima de fluidización [100, 800] cm/s.

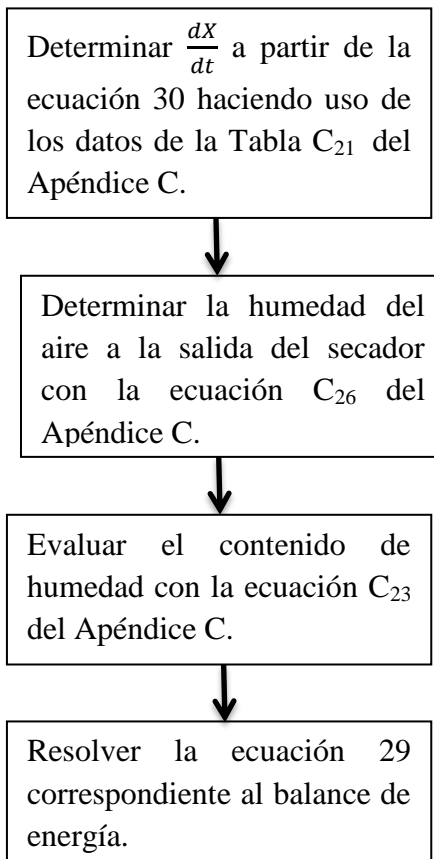
Los coeficientes de difusión efectivos se determinaron con ayuda de la herramienta *Solver* de Excel 2010, optimizando los datos experimentales de humedad en base seca con la ecuación (25), y los datos de encogimiento volumétrico experimentales con la ecuación (26). En las ecuaciones (25) y (26) se consideraron 50 términos de la serie Fourier, y la función objetivo utilizada en *Solver* fue la suma de los errores absolutos entre los datos experimentales y los datos de humedad estimados.

Con los coeficientes de difusión efectivos estimados en *Solver*, se procedió a resolver los modelos presentadas en la Tabla 5. Para las combinaciones 2 y 3, fue necesario derivar la serie de Fourier correspondiente a las ecuaciones (25) y (26), y durante la evaluación numérica en Fortran se utilizaron los primeros 100 términos. En las combinación 4 se utilizaron los ajustes y derivadas de las variables hidrodinámicas obtenidas en Origin 8.0 (Tabla C<sub>21</sub> del Apéndice C<sub>21</sub>).





**Figura 13.** Algoritmo para determinar  $U_{mf}$  y temperatura de lecho con modelo homogéneo.



**Figura 14.** Algoritmo para determinar la temperatura de lecho con el modelo hidrodinámico.

## **CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

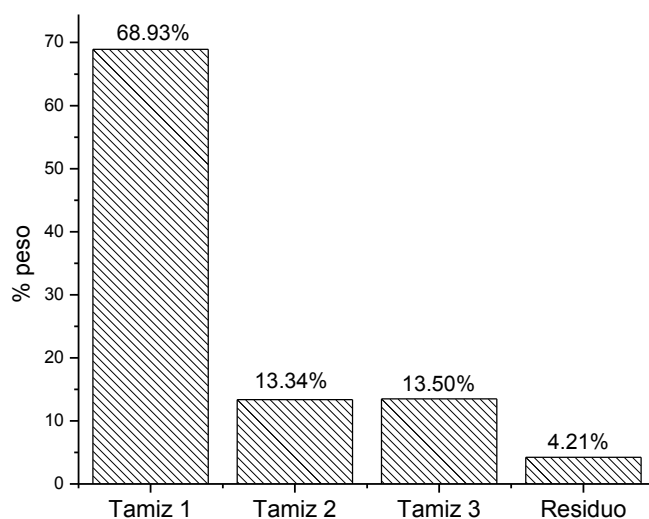
En este capítulo se presentan los resultados experimentales, teóricos, y la relación existente entre las variables estudiadas en este trabajo.

---

## 5.1 Distribución de tamaño de chícharo

Por cada kilogramo de chícharo en vaina se obtuvo  $0.447 \pm 0.011$  kg de chícharo fresco (disponible para secado) con un diámetro promedio de  $0.0084 \pm 0.00058$  m. El chícharo retenido en el tamiz 1 tuvo un diámetro promedio de  $0.0088 \pm 0.00071$  m,  $0.0080 \pm 0.00065$  m en el tamiz 2, y  $0.0074 \pm 0.00057$  m en el tamiz 3. El chícharo que no fue posible retener en los tamices se le dio el nombre de residuo y tuvo un diámetro promedio comprendido entre 0.005 m y 0.0065 m.

En la Figura 15 se observa que el  $68.93 \pm 0.056$  % peso del chícharo disponible para secado quedó retenido en el tamiz 1,  $13.34 \pm 0.078$  % en el tamiz 2,  $13.50 \pm 0.072$  % en el tamiz 3 y el  $4.21 \pm 0.028$  % corresponde a residuo.



**Figura 15.** Distribución de la masa del chícharo disponible para secado.

En la Tabla 6 se presentan las propiedades físicas del chícharo retenido en cada tamiz, y se observa que no hay diferencia importante entre ellas, lo que podría indicar que el chícharo en vaina tiene el mismo contenido de humedad independiente de su tamaño. Sin embargo, la vaina del chícharo protege a éste de posibles deformaciones durante el transporte o venta, y también disminuye la pérdida de humedad y frescura, un inconveniente del

chícharo sin vaina ya que al estar en contacto directo con el ambiente o con sistemas de refrigeración, pierde humedad.

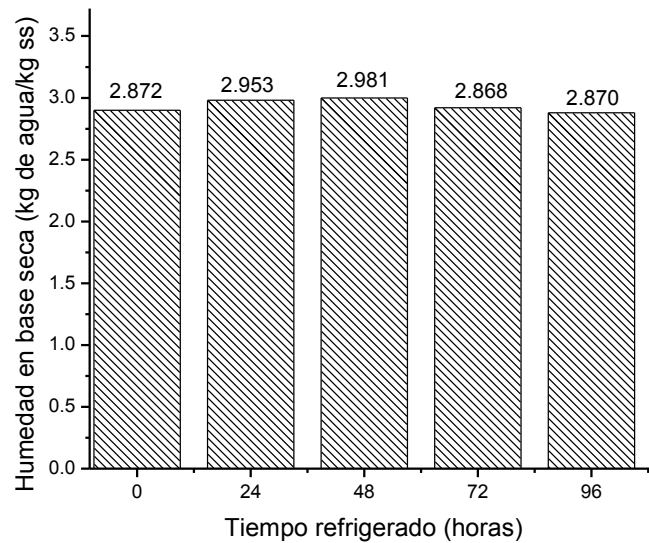
**Tabla 6.** Propiedades físicas del chícharo fresco retenido en los 3 tamices.

<b>Propiedad</b>	<b>Tamiz 1</b>	<b>Tamiz 2</b>	<b>Tamiz 3</b>
Densidad de partícula, kg/m <sup>3</sup> .	989.8 ± 14.1 <sup>a</sup>	993.6 ± 11.1	973.8 ± 15.1
Humedad, kg de agua/kg sh	0.759 ± 0.01	0.765 ± 0.017	0.78 ± 0.022
Humedad, kg de agua/kg ss	2.88 ± 0.17	2.97 ± 0.21	2.95 ± 0.11

a. Desviación estándar

En base a los resultados de distribución de tamaño y debido a que la humedad en base seca en el chícharo fue independiente de su tamaño, se utilizó únicamente el chícharo retenido en el tamiz 1, ya que de este tamaño se obtuvo la mayor cantidad de masa de por cada kilogramo de chícharo en vaina, y también porque el estudio hidrodinámico implica utilizar un tamaño homogéneo de partícula, parámetro importante en la hidrodinámica de los sistemas fluidizados.

El chícharo correspondiente al tamiz 1 se almacenó en bolsas herméticas y se refrigeró durante 24 horas para homogenizar su contenido de humedad, la cual se monitoreó cada 24 horas durante 5 días. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 16, en la cual se observan pequeños incrementos en las primeras 48 horas y una disminución de la humedad después de 72 horas. Pero el contenido de humedad después de las 96 horas fue numéricamente similar al valor obtenido a las 0 horas de refrigeración, por lo que estos resultados indican que el proceso de refrigeración podría no realizarse. Una posible explicación a estos resultados está relacionada con el uso de las bolsas herméticas ya que no permiten interacción del chícharo con el aire circundante en el refrigerador, evitando pérdida de humedad. Además, la saturación de agua en el interior de las bolsas a periodos largos de tiempo podría ser un inconveniente ya que propicia el crecimiento de microorganismos y descomposición del chícharo.



**Figura 16.** Contenido de humedad a diferentes horas de refrigeración para chícharo correspondiente al tamiz 1.

La masa del chícharo fresco, la masa correspondiente a la vaina y su distribución de tamaño, son parámetros importantes en el procesamiento del secado de chícharo por lecho fluidizado, pues permiten diseñar etapas previas (desenvainado, tamizado) al secado, y esta información podría ser útil en el cálculo de las dimensiones de un equipo de secado y la potencia del compresor necesaria para la conservación de las toneladas de producción de este alimento.

## 5.2 Propiedades físicas del chícharo fresco

La Tabla 7 presenta las propiedades físicas del chícharo fresco y chícharo escaldado, y se observa que no existen cambios considerables en estas propiedades, sin embargo, durante el escaldado se observó que el chícharo aumentó su intensidad de color y se ablandó debido a al baño térmico en este pretratamiento. Además, el enfriamiento súbito con agua a temperatura ambiente permitió que el chícharo recuperara cierta rigidez. El escaldado no influyó en las propiedades físicas del chícharo, pero mejoró la calidad del chícharo obtenido al finalizar el tiempo de secado, es decir, el chícharo seco obtenido a partir de chícharo que inicialmente se escaldó, tuvo un color más intenso y no presentó rompimiento

de su estructura como sucedió cuando no se realizó el escaldado (Figura 17). Por ello se implementó este pretratamiento en todos los experimentos.



**Figura 17.** Chícharo seco (a) sin escaldado inicial (b) con escaldado inicial

**Tabla 7.** Propiedades físicas del chícharo fresco y chícharo escaldado.

Propiedad	Resultados	
	Chícharo fresco	Chícharo escaldado
Densidad aparente, kg/m <sup>3</sup> .	989.8 ± 14.1	991.8 ± 12.1
Densidad empacada, kg/m <sup>3</sup> .	583.6 ± 9.56	587.6 ± 5.56
Humedad, kg de agua/kg sh	0.759 ± 0.01	0.778 ± 0.101
Humedad, kg de agua/kg ss	2.88 ± 0.17	2.90 ± 0.20
Diámetro de partícula, m	0.0088 ± 0.00071	0.0087 ± 0.00067

De acuerdo a la Tabla 7, el contenido de humedad del chícharo es aproximadamente 0.78 kg de agua/kg sh, equivalente a 78% peso, lo que confirma la necesidad de disminuir este contenido de humedad para conservarlo e incrementar su tiempo de anaquel.

La Tabla 8 muestra las características físicas del chícharo fresco y chícharo seco, obtenidos al utilizar escaldado como pretratamiento. De acuerdo a la Tabla 8, el chícharo presenta una disminución del 23.3% de diámetro inicial, 38.5% en densidad aparente y 33.01% en densidad empacada durante el tiempo de secado. Además sufrió un encogimiento volumétrico ( $S_b$ ) de 0.45 que equivale a una pérdida del 55% de su volumen inicial. Resultados semejantes para la disminución del diámetro de chícharo, densidad aparente, densidad empacada y encogimiento volumétrico, fueron reportados por Zielinnka et al.

(2013) quienes estudiaron el secado de chícharo por diversos métodos de secado, entre los que destaca el secado en lecho fluidizado.

**Tabla 8.** Propiedades físicas del chícharo utilizando escaldado como pretratamiento.

Propiedad	Resultado	
	Chícharo fresco	Chícharo seco
Densidad aparente, kg/m <sup>3</sup> .	991.8 ± 12.1	609.85 ± 18.1
Densidad empacada, kg/m <sup>3</sup> .	587.6 ± 5.56	393.6 ± 9.56
Diámetro de partícula, m	0.0087 ± 0.0006	0.0067 ± 0.0005
Encogimiento volumétrico equivalente	1.0	0.44 ± 0.023

La masa de chícharo necesaria en cada experimento y que tuvo que ser escaldado se muestra en la Tabla 9, en la que se observa que para la relación L/D = 1.5 fue necesario 2 kg de chícharo en vaina.

**Tabla 9.** Masa de chícharo a utilizar en cada experimento.

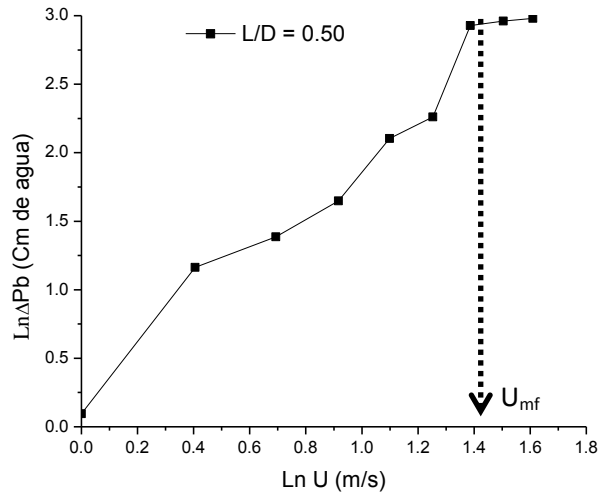
Relación L/D	Masa de chícharo a escaldar( kg)	Masa de chícharo (kg) en vaina
0.5	0.21 ± 0.00001 <sup>b</sup>	0.68 ± 0.00001
1.0	0.42 ± 0.00001	1.37 ± 0.00001
1.5	0.63 ± 0.00001	2.04 ± 0.00001

b. Precisión de la balanza analítica.

### 5.3 Propiedades hidrodinámicas del chícharo fresco

La caída de presión del lecho ( $\Delta P_b$ ) de chícharo en condiciones mínimas de fluidización (Figura 18) a una relación L/D = 0.50 alcanza un valor de 3.9 m/s de velocidad superficial en condiciones mínimas de fluidización. La caída de presión en condiciones mínimas de fluidización se estimó teóricamente con la ecuación A<sub>3</sub> del apéndice A, y los resultados muestran que a mayor relación L/D, mayor es la caída de presión en el lecho. Se obtuvieron valores de 274.52Pa, 796 Pa y 1333 Pa, para L/D = 0.5, 1.0 y 1.5, respectivamente.





**Figura 18.** Caída de presión en el lecho a diferentes velocidades de aire.

Las propiedades hidrodinámicas del chícharo fresco y chícharo seco para las relaciones L/D estudiadas se presentan en la Tabla 10, y se observa que para una relación L/D = 0.50 al finalizar el tiempo de secado, la fracción vacía disminuyó 30%, la caída de presión total en el secador 80%, y la velocidad superficial en condiciones mínimas de fluidización en 50%, respecto a los valores correspondientes al chícharo fresco medible al tiempo t=0. La velocidad mínima de fluidización en el chícharo seco fue semejante en las tres relaciones L/D, no así la fracción vacía, altura de lecho y caída de presión que tuvieron cambios a medida que la relación L/D se incrementó.

**Tabla 10.** Propiedades hidrodinámicas del chícharo al tiempo  $t=0$ .

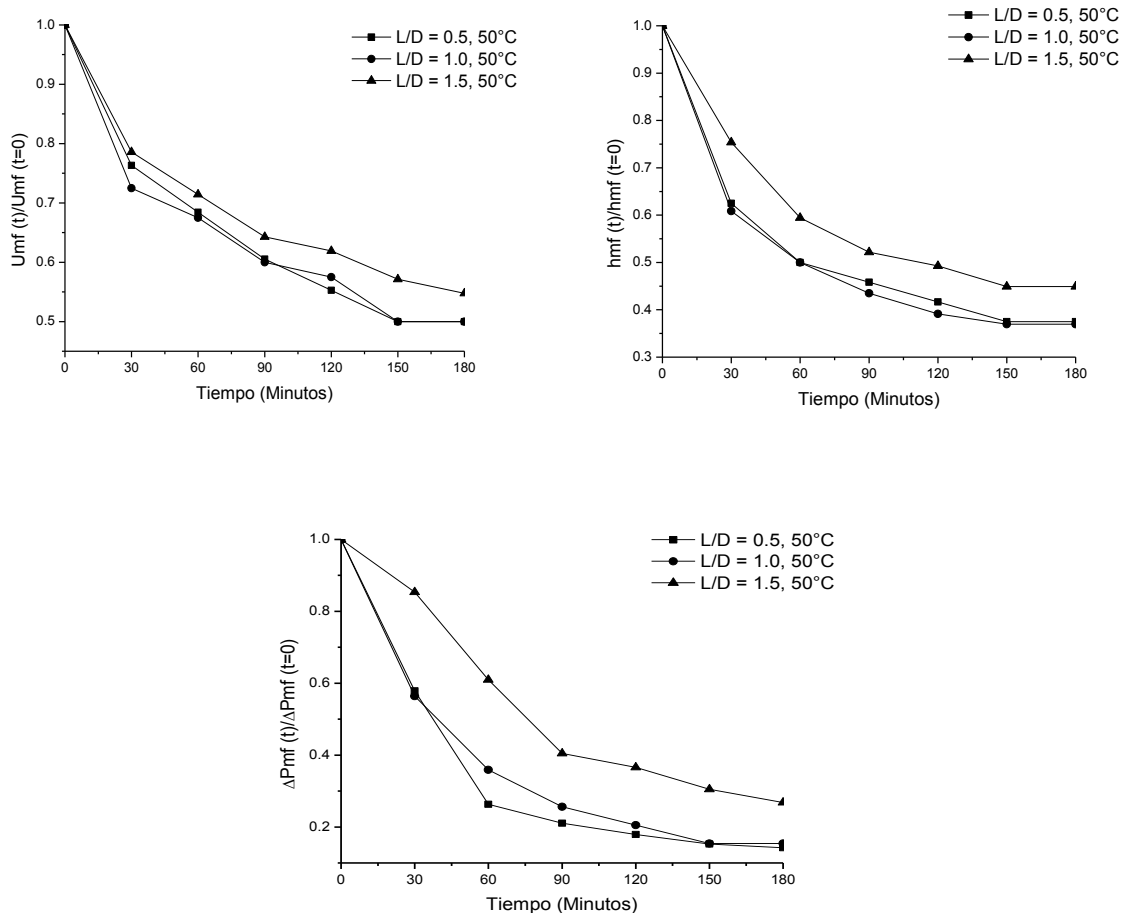
Relación L/D	$\epsilon_{mf}$	$h_{mf}$ , m	$\Delta P_{mf}$ , m de agua	$U_{mf}$ , m/s
<b>Chícharo fresco</b>				
0.5	$0.61 \pm 0.0077$	$0.0525 \pm 0.001^c$	$0.53 \pm 0.036$	$3.8 \pm 0.1^d$
1.0	$0.62 \pm 0.0097$	$0.110 \pm 0.001$	$0.54 \pm 0.033$	$3.9 \pm 0.1$
1.5	$0.63 \pm 0.029$	$0.158 \pm 0.001$	$0.55 \pm 0.028$	$4.0 \pm 0.1$
<b>Chícharo seco</b>				
0.5	$0.43 \pm 0.032$	$0.018 \pm 0.001$	$0.054 \pm 0.006$	$1.9 \pm 0.1$
1.0	$0.48 \pm 0.098$	$0.034 \pm 0.001$	$0.062 \pm 0.003$	$1.9 \pm 0.1$
1.5	$0.5 \pm 0.039$	$0.062 \pm 0.001$	$0.068 \pm 0.008$	$2.0 \pm 0.1$

c. Escala del papel milimétrico    d. Precisión del anemómetro.

La velocidad terminal estimada con la ecuación (9) para el chícharo fresco fue 23.18 m/s, es decir, 6.2 veces la velocidad superficial en condiciones mínimas de fluidización para chícharo fresco. Los valores para  $d_p^*$  y  $u^*$  calculados con las ecuaciones (7) y (8) fueron 5.33 y 225.83, respectivamente. Estos resultados ubicaron al secador en régimen burbujeante con la característica de un lecho a chorro o “Spouted bed” (Figura 8) (Kunii y Levenspiel, 1991).

#### 5.4 Propiedades hidrodinámicas del chícharo durante el secado

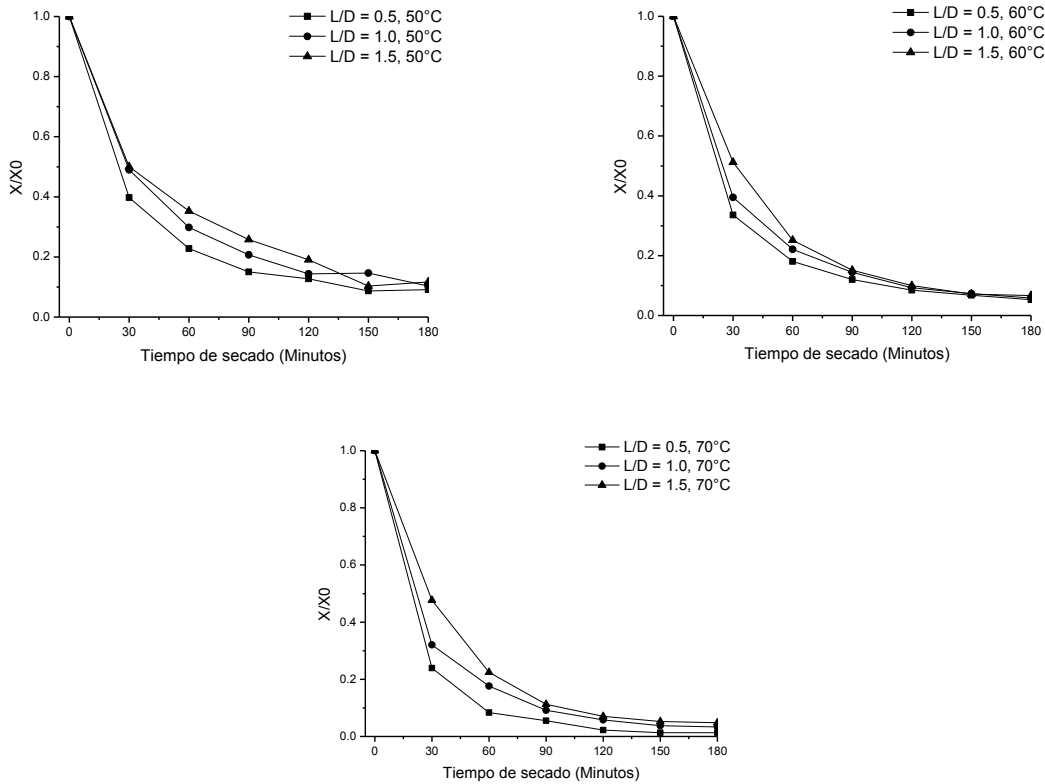
Conforme transcurrió el tiempo de secado, los parámetros  $\Delta P_{mf}(t)/\Delta P_{mf}(t=0)$ ,  $U_{mf}(t)/U_{mf}(t=0)$  y  $h_{mf}(t)/h_{mf}(t=0)$  disminuyeron (Apéndices E, F, y G), tales disminuciones confirman que efectivamente los parámetros hidrodinámicos del secador se ven afectados durante el secado. Sin embargo, no queda claro qué es lo que provoca la disminución de estas propiedades. En primer lugar se pensaría que se debe a la pérdida de humedad en el chícharo y en segundo lugar que se debe a la disminución del diámetro del chícharo, por ello se realizaron experimentos de secado para cuantificar el encogimiento volumétrico del chícharo, para con ello tratar de explicar los resultados que se muestran en la Figura 19.



**Figura 19.** Cambios de las variables hidrodinámicas a 50°C y diferentes relaciones L/D.

### 5.5 Secado de chícharo

Las curvas de secado para las tres relaciones L/D y temperaturas del aire de secado, muestran forma sigmoidea, y se observa que a mayor temperatura en el aire de secado mayor fue la remoción de humedad en el chícharo en los primeros 120 minutos de secado y después de este tiempo el contenido de humedad final en el chícharo (Figura 20) tuvo valores semejantes a 60°C y 70°C.

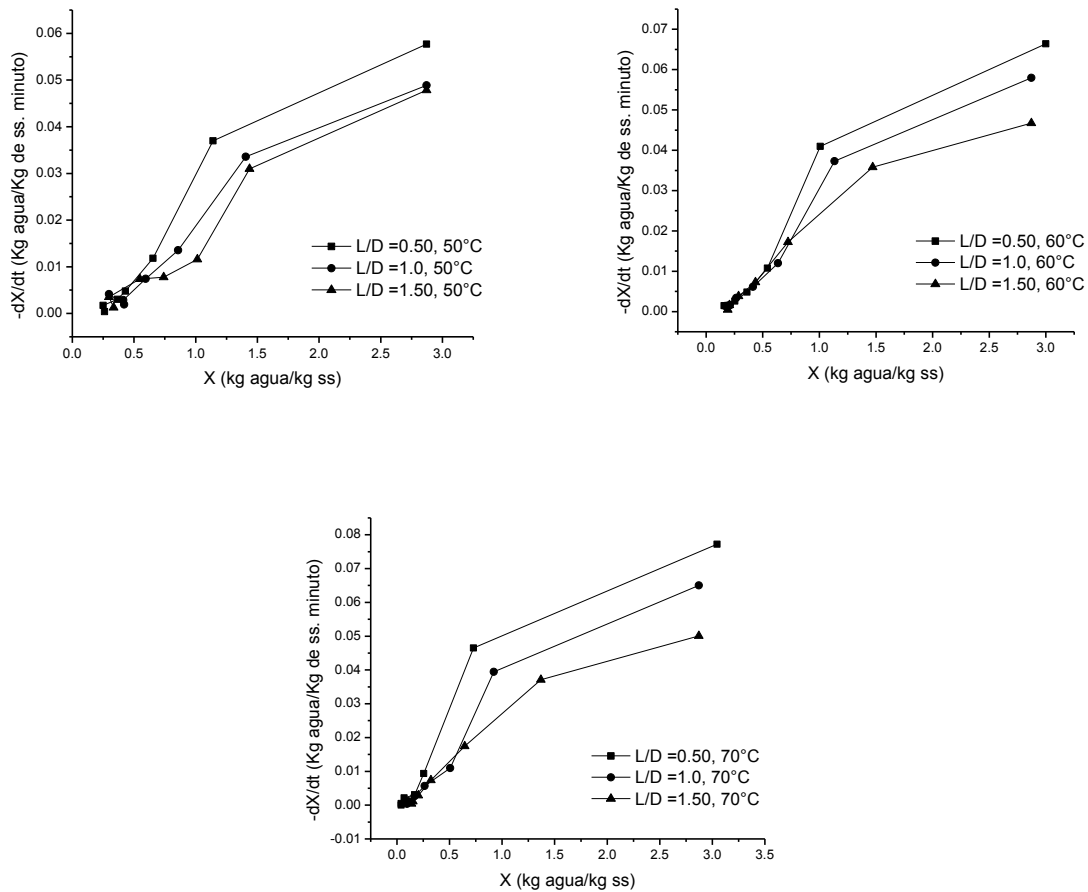


**Figura 20.** Curvas de secado en lecho fluidizado a diferentes relaciones L/D y temperatura del aire de secado.

### 5.5.1 Velocidad de secado

En la Figura 21 se presenta la velocidad de secado  $-\frac{dX}{dt}$  de chícharo en función del contenido de humedad en base seca obtenida a los tres niveles de temperatura del aire de secado y relaciones L/D estudiada. En esta gráfica es notorio el efecto térmico del aire de secado, pues a mayor temperatura mayor es la velocidad de secado, para una relación L/D constante.

Independiente de la relación L/D en los primeros minutos del secado de chícharo, el sólido tiene disponibilidad de humedad y por ello se obtiene la mayor rapidez de secado, sin embargo debido al secado esta rapidez disminuye.



**Figura 21.** Velocidad de secado de chícharo en lecho fluidizado.

En la Figura 21 se observa que a una misma temperatura del aire de secado, al incrementar la relación L/D, existe disminución de  $-\frac{dX}{dt}$  mas baja debido a la masa de chícharo presente en el secador, por lo que puede decirse que la rapidez de secado es menor a mayor L/D. Se esperaría que el contenido de humedad al finalizar el tiempo de secado fuera mayor al incrementar L/D, esto fue cierto para 50°C y 70°C, no así a 60°C donde el contenido final de humedad fue semejante.

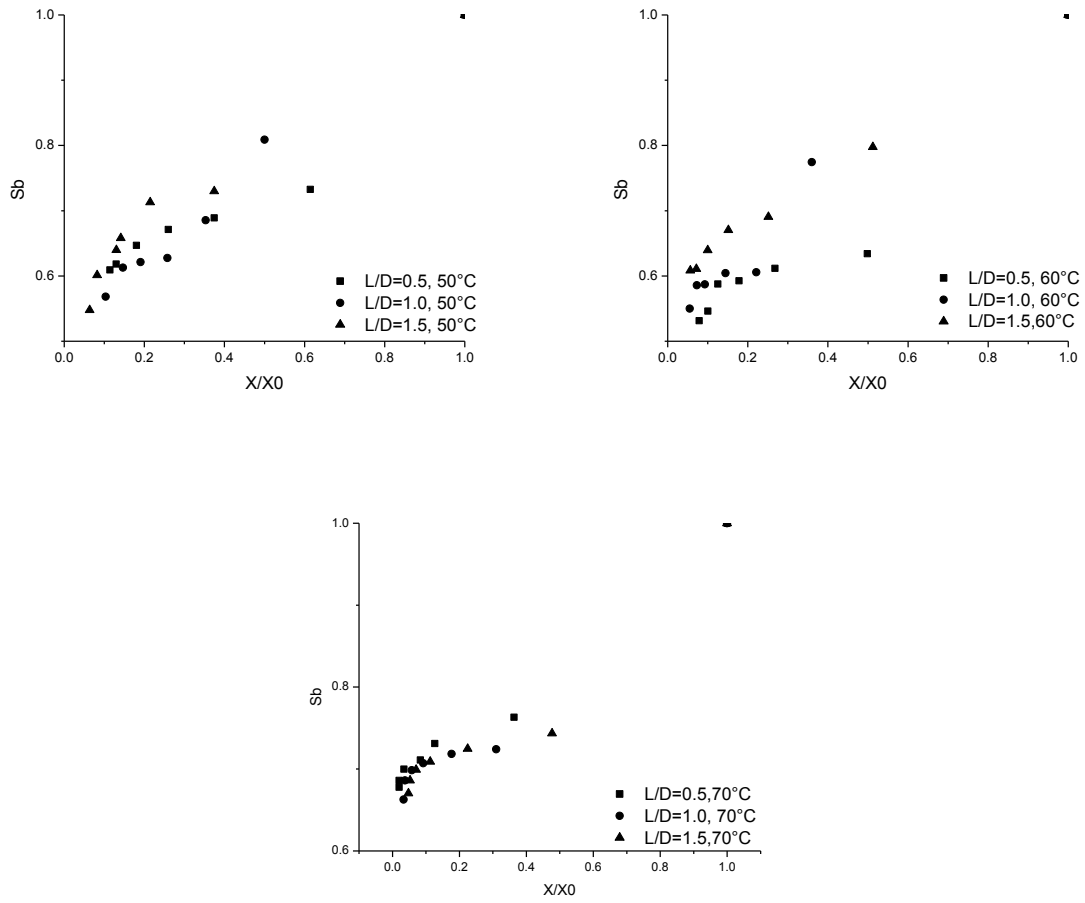
Las curvas de velocidad de secado no muestran mesetas típicas del periodo de secado constante, sin embargo, el contenido de humedad en el chícharo disminuyó rápidamente en los primeros 30 minutos (aproximadamente 40% de su valor inicial) de secado, dejando abierta la posibilidad de que hubiese este periodo de secado. Después de este tiempo es

posible que el secado de chícharo esté controlado por la difusión interna de la humedad, característica de un periodo de secado decreciente.

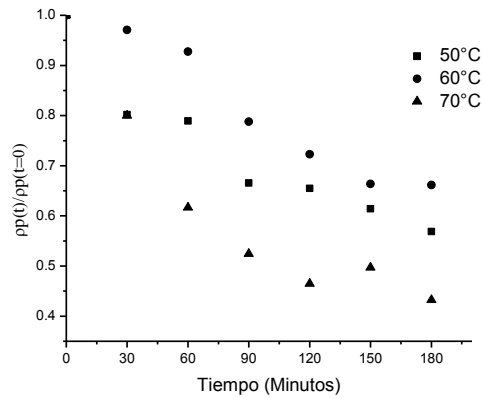
### **5.5.2 Tipo de encogimiento en chícharo durante el secado**

En la Figura 22 se observa que independiente de la relación  $L/D$ , existe una relación no lineal entre el encogimiento volumétrico y la fracción de humedad ( $X/X_0$ ) en el chícharo durante el secado lo que indica que el encogimiento volumétrico fue no ideal, es decir, la pérdida de masa no fue directamente proporcional a su pérdida de volumen. En otras palabras el chícharo perdió más masa (disminución más rápida de  $X/X_0$ ) que volumen (disminución lenta de  $S_b$ ), por lo que su densidad aparente disminuyó en el tiempo de secado a las tres temperaturas de estudio. La Figura 23 confirma la disminución de la densidad del chícharo y además muestra el siguiente comportamiento para una relación  $L/D = 0.50$ : densidad aparente a  $70^\circ\text{C} <$  densidad aparente a  $50^\circ\text{C} <$  densidad aparente a  $60^\circ\text{C}$ . Tendencias semejantes se encontraron para las otras dos relaciones  $L/D$  estudiadas (Apéndice I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub>).

Resultados semejantes para velocidad de secado, tipo de encogimiento volumétrico y periodo de secado, fueron reportados por García (2012) en su tesis de maestría, en la que estudió el secado de chícharo en capa delgada en un secador de túnel.



**Figura 22.** Relación del contenido de humedad y el encogimiento volumétrico, para L/D = 0.5.



**Figura 23.** Densidad aparente relativa de chícharo a diferentes temperaturas y L/D = 0.50.

### 5.5.3 El encogimiento volumétrico del chícharo durante el tiempo de secado

Los valores de densidad empacada, densidad aparente y diámetro del chícharo fresco y chícharo seco, confirmaron que éste presentó encogimiento volumétrico, es decir, el chícharo perdió agua y volumen durante el secado. En la Figura 24 se muestra el encogimiento volumétrico del chícharo a las diferentes relaciones L/D y temperaturas del aire de secado, y se observa que independientemente de la relación L/D, el encogimiento volumétrico menor se obtiene a 60°C y el mayor a 70°C, en otras palabras, el chícharo presentó mayor pérdida de volumen a 60°C.

García (2012) estudió el secado de chícharo en capa delgada y analizó la superficie del chícharo con microscopía electrónica de barrido. Reportó que la temperatura del aire de secado favorece la velocidad de secado en el chícharo y que ésta influye en el encogimiento volumétrico del mismo. Encontró que a 60°C la velocidad de secado origina el encogimiento volumétrico debido a que en la pared celular del chícharo existe estrés, sin embargo a 70°C observó la formación de una capa de proteína-almidón en la superficie del chícharo, esta capa es permeable a la humedad y proporciona cierta rigidez al chícharo evitando considerablemente el encogimiento volumétrico.

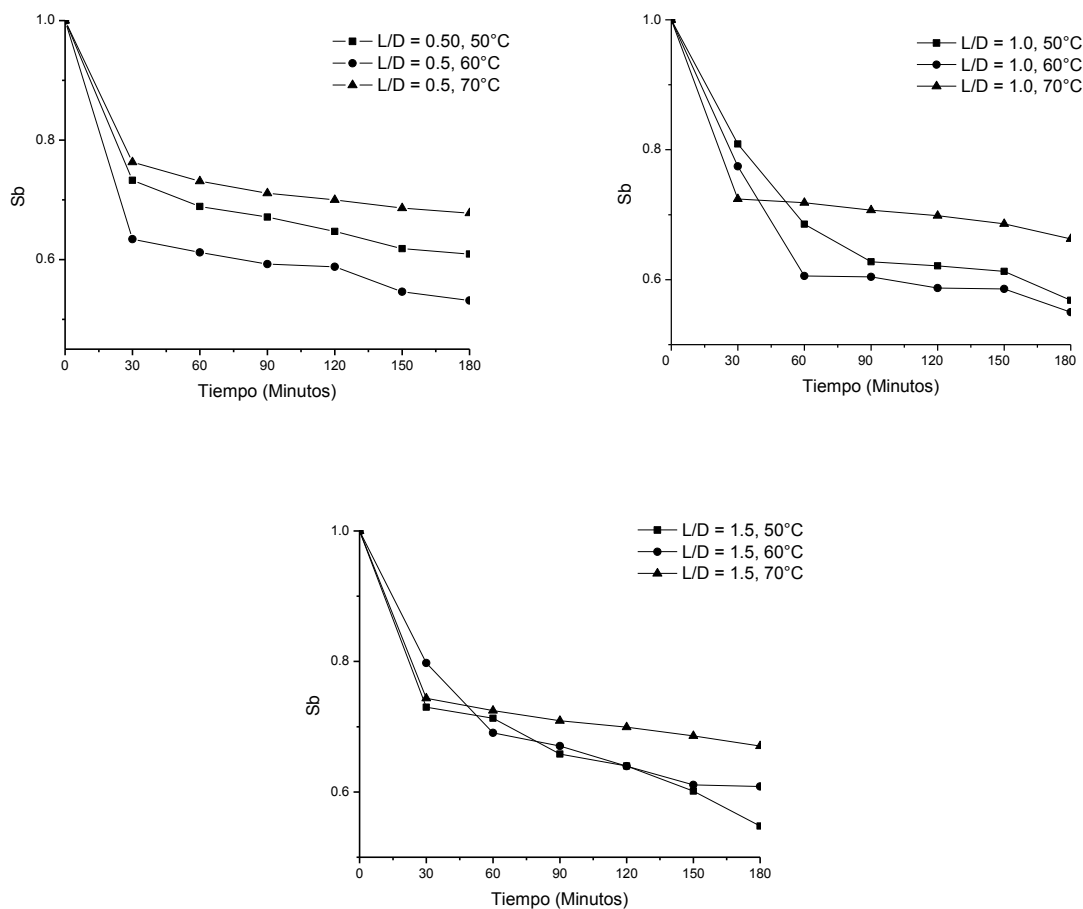
Los resultados obtenidos para el encogimiento volumétrico a 60°C y 70°C pueden ser explicados a partir de los resultados de García (2012).

Los resultados de encogimiento volumétrico obtenidos a 50°C fueron menores que los obtenidos a 70°C y superiores a los obtenidos a 60°C, esto posiblemente se debe al escaldado y a la temperatura del aire de secado (50°C), pues a baja temperatura la velocidad de secado es menor, lo que no genera un estrés importante en la estructura celular del chícharo.

En la Figura 24 se observa que al finalizar el tiempo de secado, el encogimiento volumétrico fue 0.50, 0.54 y 0.53, para 0.50, 1.0 y 1.5 de relación L/D. Las gráficas de la Figura 24 se van aproximando, es decir, las líneas correspondientes a una L/D = 0.50 están separadas considerablemente si se comparan con las líneas correspondientes a las otras dos relaciones de L/D, esta abertura en las líneas se debe a que a menor relación L/D el contenido de masa es menor y la velocidad del aire de secado (que se mantuvo constante



) provocó un movimiento más turbulento ocasionando atrición entre las partículas de chícharo contribuyendo así al encogimiento volumétrico.



**Figura 24.** Encogimiento volumétrico de chícharo a diferentes relaciones L/D y temperaturas del aire de secado.

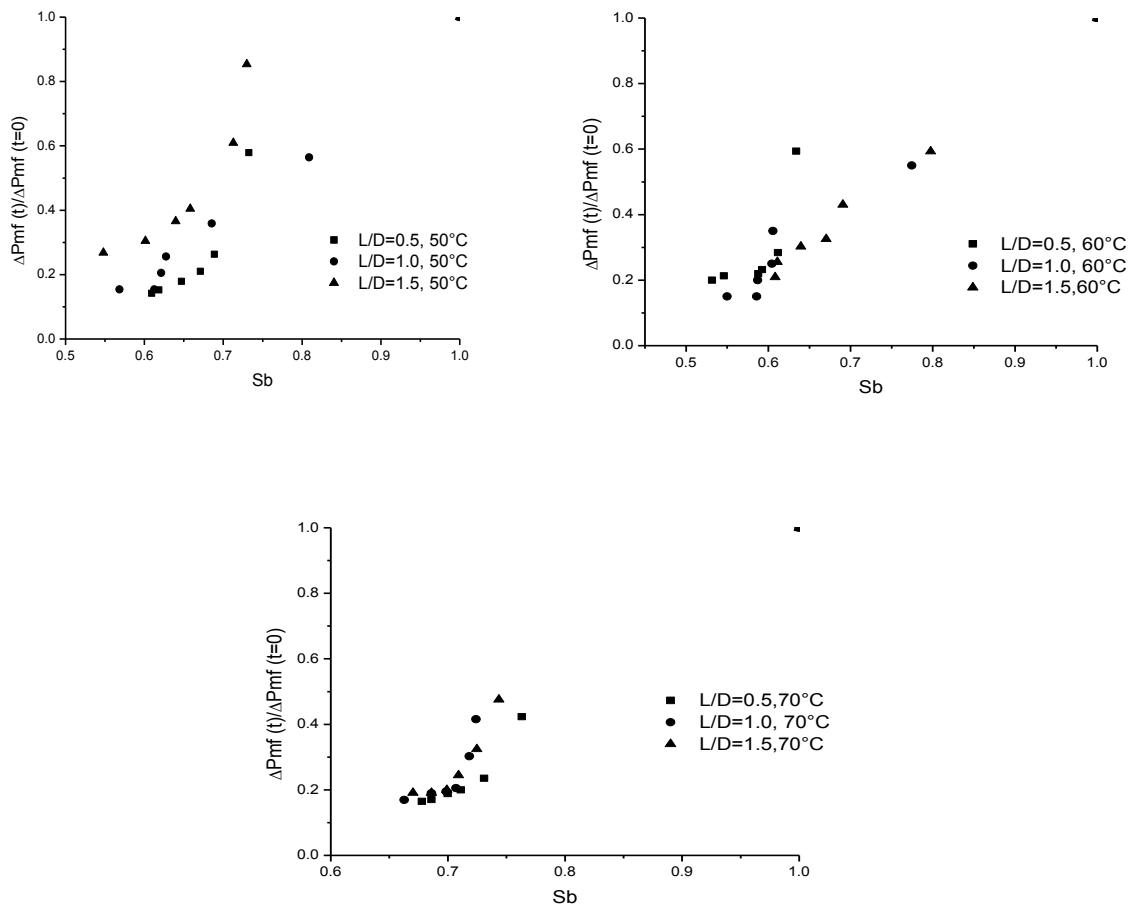
## 5.6 Efecto del encogimiento volumétrico en las propiedades hidrodinámicas del chícharo durante el secado

Terminados los experimentos de secado se procedió a organizar la información para relacionarla con los datos experimentales de las variables hidrodinámicas.

### 5.6.1 Efecto del encogimiento volumétrico en la caída de presión

En la Figura 25 se observa que el encogimiento volumétrico provoca que la caída de presión total en el secador en condiciones mínimas de fluidización disminuya en un 85 %

respecto a su valor inicial. Esto posiblemente se debe al secado del chícharo ya que al perder humedad la masa de chícharo disminuye y su densidad también, por lo tanto se requiere de un flujo volumétrico menor de aire para fluidizarlo. La caída de presión depende de la altura de lecho, de la fracción vacía, de las propiedades físicas del aire, y del diámetro y densidad aparente del chícharo, que también disminuyeron durante el secado, por ello es razonable que la caída de presión disminuyera considerablemente.



**Figura 25.** Encogimiento volumétrico del chícharo y su relación con la caída de presión del lecho.

Independiente de la relación  $L/D$  a  $60^\circ\text{C}$ , después de los 180 minutos de secado, se obtuvo la menor relación  $\Delta P_{mf}(t)/\Delta P_{mf}(t=0) \approx 0.17$ , esto está de acuerdo con lo ya discutido en el punto 5.5.3 para el encogimiento volumétrico, punto en el cual se mencionó que la mayor pérdida de volumen fue a  $60^\circ\text{C}$ .

En la Figura 25 no es muy claro el efecto de la relación L/D en la caída de presión en el secador, lo que hace pensar que la caída en el distribuidor es mucho mayor comparado con la caída de presión debida al lecho de chícharo, lo que de alguna manera enmascara un posible efecto. Lo anterior implicó hacer cálculos para la relación  $\frac{\Delta P_d}{\Delta P_b}$  y se obtuvieron valores en el intervalo de 4.2-5.4 para las tres relaciones L/D, mientras que lo recomendable es operar  $\frac{\Delta P_d}{\Delta P_b}$  entre 0.2 y 0.40.

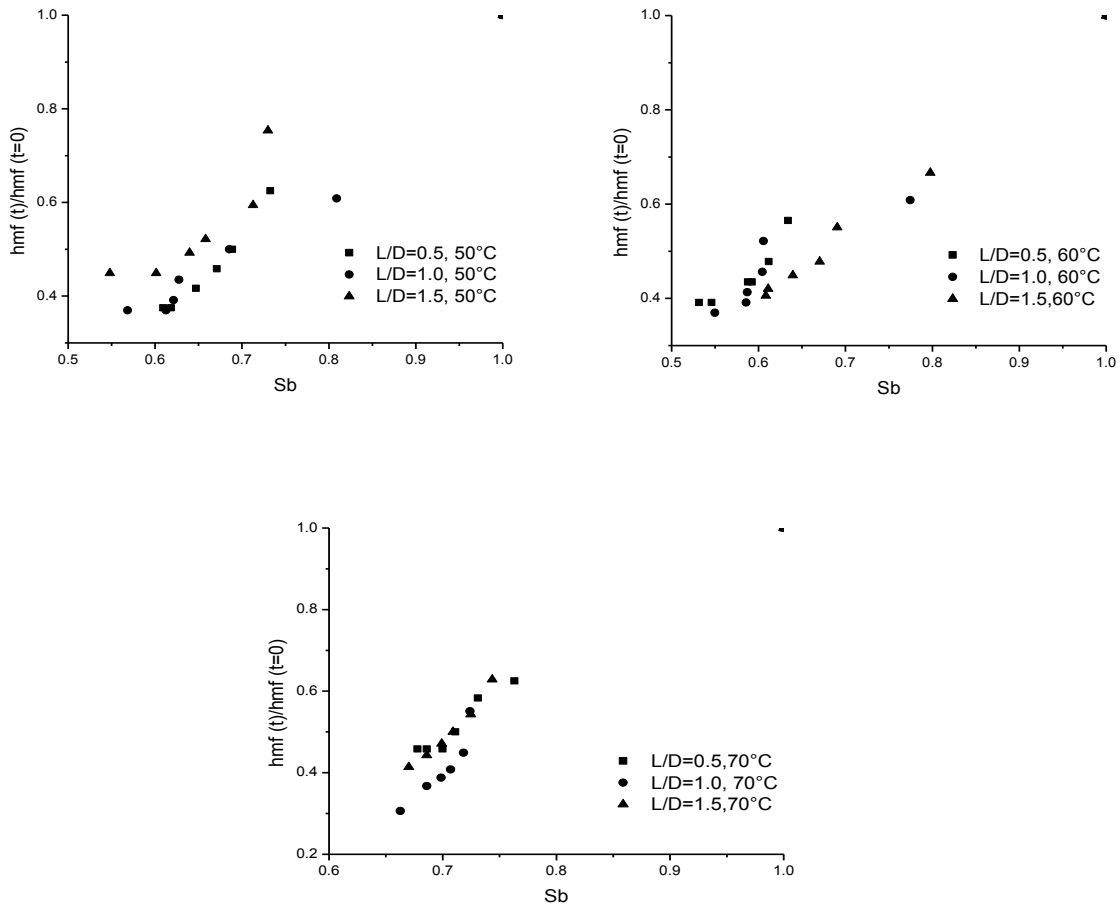
En el Apéndice M se presentan gráficos que muestran un efecto de la relación L/D en la caída de presión en lecho a condiciones mínimas de fluidización, estos resultados se calcularon con la ecuación A<sub>3</sub> del Apéndice A, alimentado los datos experimentales obtenidos en este trabajo. Los resultados muestran que a mayor L/D mayor existe un aumento de la caída de presión en el lecho. Además en el Apéndice N se observa el efecto del secado cuando la relación L/D es constante, pues a mayor temperatura del aire de secado menor es el contenido de humedad y menor es la caída de presión en el lecho a los diferentes tiempos de secado.

Durante las mediciones de la caída de presión total en el sistema, en todos los experimentos, se observaron oscilaciones del fluido manométrico en los primeros 30 minutos de secado. Esto confirmó que el régimen de operación del secador fue “*Spouted bed*”.

### **5.6.2 Efecto del encogimiento volumétrico en la altura mínima de fluidización**

Para complementar la explicación de los resultados de la Figura 25 es importante ver la Figura 26 en la que se observa que la altura mínima de fluidización fue disminuyendo a medida que transcurría el tiempo secado a causa del encogimiento volumétrico, es decir, la disminución del diámetro del chícharo provocó que la altura de lecho descendiera.

Sin embargo, es importante mencionar que la masa del lecho fue disminuyendo y dado que el flujo de aire se mantuvo constante, el aire expandió el lecho en todos los experimentos. Pero en este trabajo únicamente se realizaron mediciones de altura de lecho en condiciones mínimas de fluidización, encontrando que ésta, disminuyó en un 60% de su valor inicial.

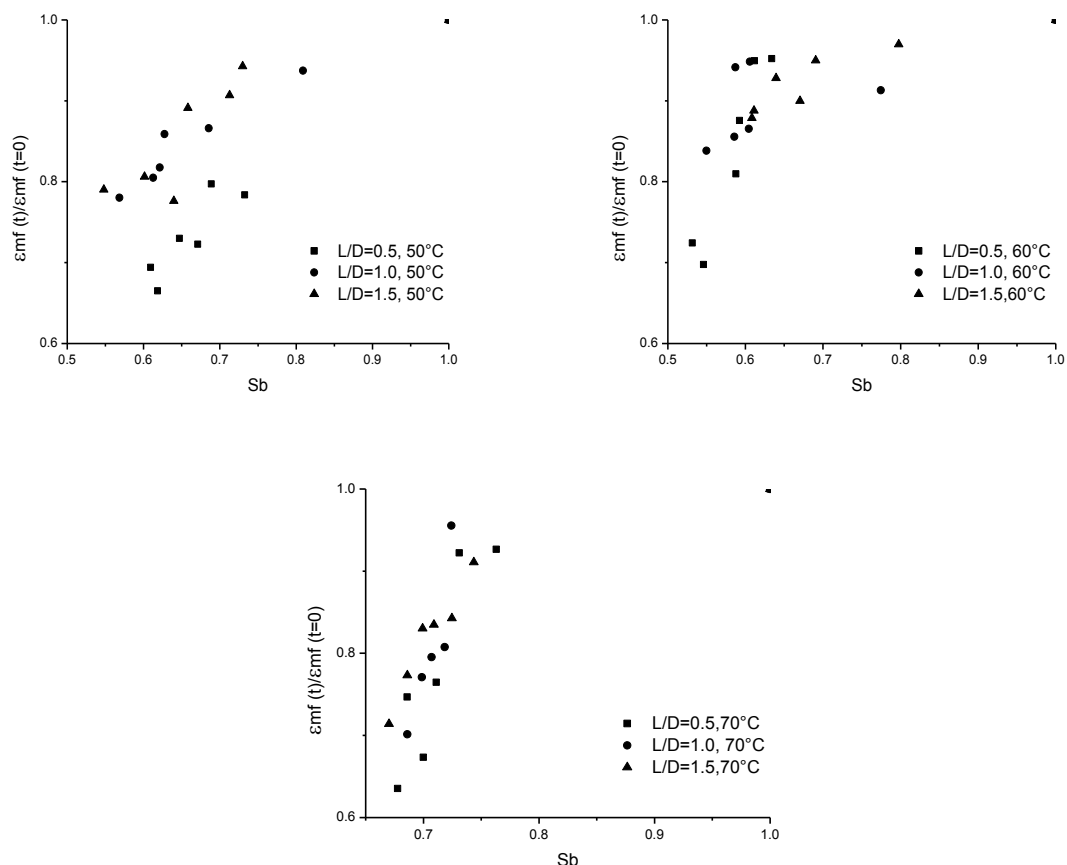


**Figura 26.** Encogimiento volumétrico del chícharo y su relación con la altura mínima de fluidización del lecho.

### 5.6.3 Efecto del encogimiento volumétrico en la fracción vacía mínima de fluidización

La fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización fue estimada a partir de la ecuación (6) y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 27, en la cual se observa que el encogimiento volumétrico provoca que la fracción vacía disminuya debido a que la altura mínima de fluidización y el diámetro del chícharo también lo hacen, dejando menos espacios vacíos en el lecho de chicharos. La fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización disminuyó en un 20% para las relaciones  $L/D = 1.50$  a diferentes temperaturas, y un 35% para las relaciones  $L/D = 0.50$ , es decir, pasó de 0.61 a 0.50, y de 0.61 a 0.40, respectivamente. No se observa una relación directa entre la temperatura y la fracción

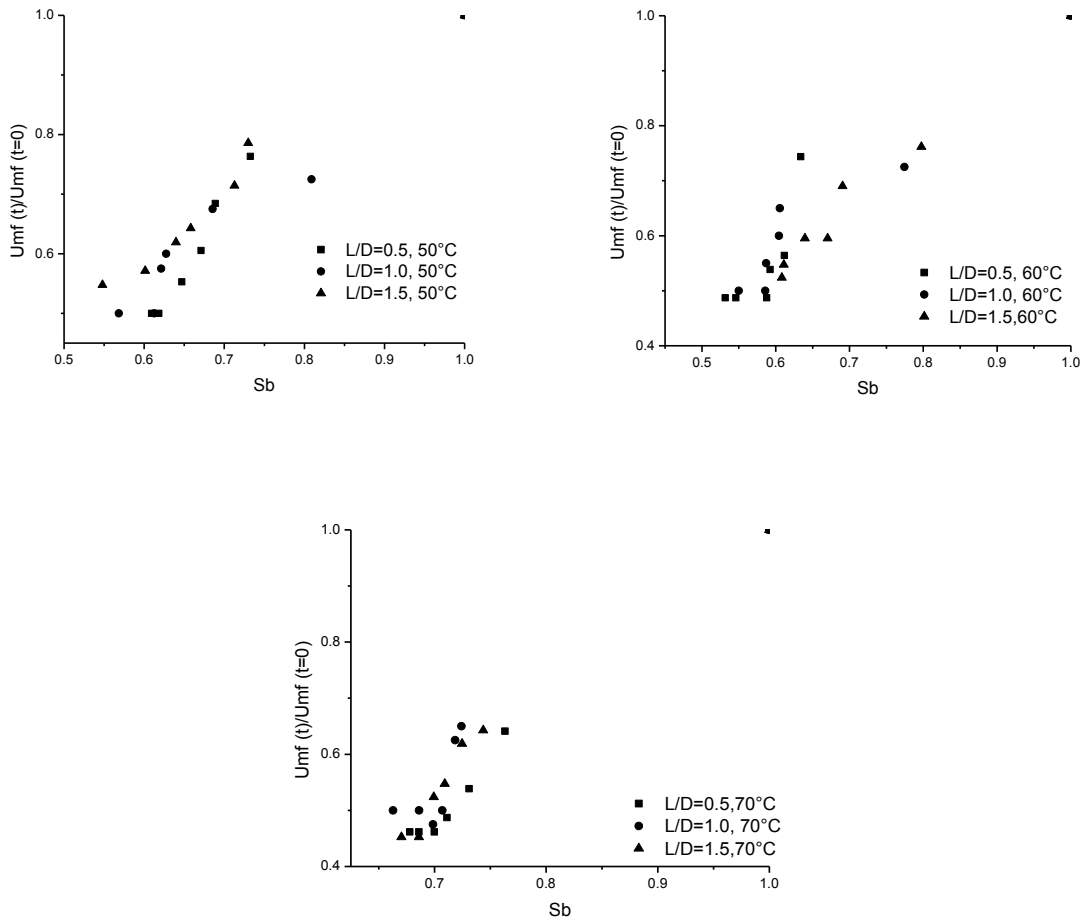
vacía en condiciones mínimas de fluidización, pero se esperaría obtener un menor valor a temperaturas de 50°C y 60°C en donde hubo más pérdida de volumen, comparado con la pérdida de volumen obtenida a 70°C. Las dispersiones de los datos de fracción vacía están sujetas a las mediciones de contenido de humedad y altura de lecho en condiciones mínimas de fluidización.



**Figura 27.** Encogimiento volumétrico del chícharo y su relación con la fracción vacía mínima de fluidización del lecho.

#### 5.6.4 Efecto del encogimiento volumétrico en la velocidad mínima de fluidización

El encogimiento volumétrico del chícharo afectó la velocidad mínima de fluidización durante el secado, pues ésta depende del diámetro del chícharo y de la fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización, y de las propiedades físicas del aire.



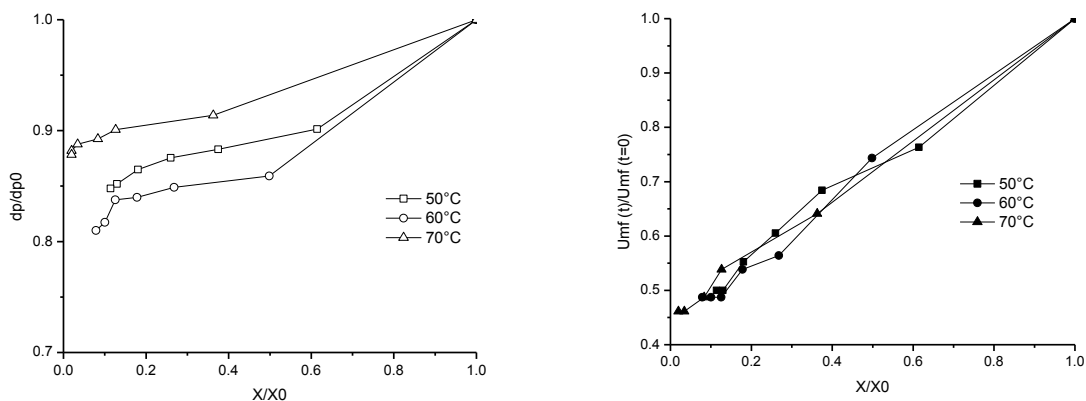
**Figura 28.** Encogimiento volumétrico del chícharo y su relación con la velocidad mínima de fluidización del lecho.

La relación  $U_{mf}(t)/U_{mf}(t=0)$  más baja se obtuvo a  $70^{\circ}\text{C}$ , temperatura a la cual se obtuvieron valores más alto de encogimiento volumétrico (menor pérdida de volumen). Lo anterior implica que la densidad aparente del chícharo a esta temperatura fue menor respecto a la densidad aparente a  $60^{\circ}\text{C}$  donde se obtuvo el menor encogimiento volumétrico. Por ello a  $50^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$  se obtuvieron valores de relación  $U_{mf}(t)/U_{mf}(t=0)$  prácticamente iguales, pero que fueron mayores a las relaciones  $U_{mf}(t)/U_{mf}(t=0)$  obtenidas a  $70^{\circ}\text{C}$ , lo que es razonable, pues la densidad aparente es un parámetro que influye en la velocidad mínima de fluidización, y ésta fue menor a  $70^{\circ}\text{C}$ .

## 5.7 Relación entre la hidrodinámica y el secado de chícharo

La velocidad mínima de fluidización para el chícharo fresco ( $t=0$ ) tuvo un valor máximo al inicio del secado, debido a que en este tiempo el chícharo presentó el mayor diámetro de partícula, mayor fracción vacía en el lecho y mayor contenido de humedad. Pero esta velocidad disminuyó en el transcurso del secado porque el diámetro de partícula, contenido de humedad y la densidad aparente del chícharo, también disminuyeron. Mujumdar (2006) estudió el secado de alimentos en lecho fluidizado y encontró que las partículas con alto contenido de humedad fluidizan a velocidades más altas si se comparan con partículas secas del mismo tamaño.

Hatamipour y Mowla (2006) estudiaron el secado de chícharo de 10.5, 8.5 y 7.5 mm de diámetro, con partículas inertes (esféricas) de 2.7 mm, y encontraron una relación lineal de la forma  $\frac{d_p}{d_{p0}} = A_1 X + B_1$  entre  $d_p/d_{p0}$  y el contenido de humedad para chícharo. Los resultados experimentales obtenidos en este trabajo se presentan en la Figura 29, y estos se ajustaron a una ecuación de la forma  $\frac{d_p}{d_{p0}} = A_{11} \left(\frac{X}{X_0}\right) + B_{11}$  obteniendo coeficientes de correlación ( $R^2 > 0.90$ ).



**Figura 29.** Velocidad mínima de fluidización,  $X/X_0$  y  $d_p/d_{p0}$  a una relación  $L/D = 0.50$ .

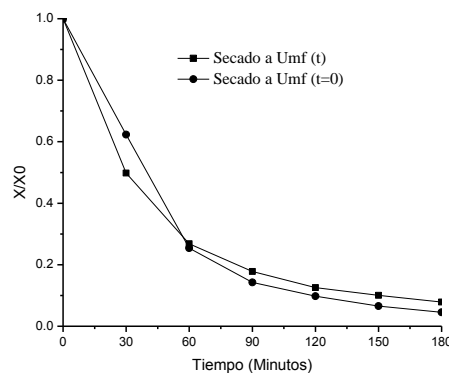
Senadeera et al (2006) estudiaron secado de chícharos en lecho fluidizado a diferentes alturas de lecho, y reportaron una relación lineal entre la velocidad mínima de fluidización y el contenido de humedad. Los resultados experimentales en este trabajo se

ajustaron a una ecuación de la forma  $\frac{Umf(t)}{Umf(t=0)} = A \left( \frac{X}{X_0} \right) + B$ , obteniendo coeficientes de correlación ( $R^2 > 0.98$ ) para las diferentes relaciones L/D estudiadas. Los resultados de la Figura 29 presentaron la misma tendencia para la relación L/D = 1.0 y 1.5 a las diferentes temperaturas (Apéndice G, Apéndice H, y Apéndice J).

### 5.7.1 Secado de chícharo a condiciones mínimas de fluidización

Para evaluar el efecto de la hidrodinámica en el secado de chícharo se realizó un experimento de secado operando el secador a las condiciones de velocidad mínima de fluidización según los resultados de la hidrodinámica. La finalidad de este experimento es observar que tanta humedad es posible remover del chícharo cuando se opera en condiciones de velocidad mínima obtenidas a cada 30 minutos de secado y compararla con la humedad removida a las condiciones de operación en este trabajo. De no existir diferencias importantes entre los contenidos de humedad, el hecho de operar el secador a condiciones de velocidad mínima ayudaría a disminuir costos energéticos de aire, visualizando la instalación de un controlador para manipular el flujo de aire en el secador.

Los resultados de este experimento se muestran en la Figura 30, y se observa que la relación  $X/X_0$  para el chícharo después de 180 minutos de secado, es ligeramente mayor cuando se opera el secador a las condiciones de velocidad superficial mínima de fluidización que tiene el chícharo a cada 30 minutos.



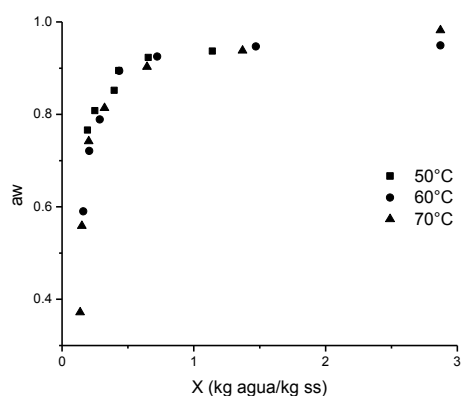
**Figura 30.** Contenido de humedad en el chícharo secado a diferentes velocidades de aire.



## 5.8 Actividad del agua y su relación con el secado

La actividad del agua está relacionada directamente con la humedad no ligada en el chícharo, y a medida que transcurre el tiempo de secado, la humedad en la superficie del chícharo disminuye por lo que la presión de vapor de ésta es menor respecto a la presión de vapor del agua pura a las mismas condiciones de temperatura de lecho.

Independiente del método de secado los alimentos deben tener como mínimo un valor de actividad del agua de 0.60, que equivale al 10 % peso, esto para evitar el crecimiento de microorganismos biológicos e incrementar el tiempo de anaquel de los mismos, aunque es recomendable secar los alimentos hasta un 5% peso (Geankoplis, 1998). En todos los experimentos se obtuvieron valores inferiores a 0.60 para actividad de agua. Por ejemplo para la relación  $L/D = 1.5$  en la que se secó la mayor cantidad de masa de chícharo, se obtuvo un valor de 0.37 de actividad del agua a  $70^{\circ}\text{C}$  y 0.58 a  $60^{\circ}\text{C}$  (Figura 31).



**Figura 31.** Actividad de agua a diferentes contenidos de humedad en base seca.

Los valores correspondientes de actividad de agua en el chícharo seco a diferentes temperaturas y relación  $L/D = 0.50$  se presentan en la Tabla 11, y estos datos se sustituyeron en la ecuación (27) para el cálculo de  $X_e$  que se utilizó para la obtención de las constantes de secado y coeficientes de difusión efectivos.

**Tabla 11.** Actividad de agua y humedad de equilibrio de chícharo a una relación L/D = 0.50.

Temperatura del aire de secado, °C	$a_w$	$X_e$ , kg de agua/kg de ss
50	$0.680 \pm 0.020$	0.1069
60	$0.60 \pm 0.021$	0.0803
70	$0.370 \pm 0.018$	0.0360

### 5.9 Temperaturas del lecho durante el tiempo de secado

Durante el secado de chícharo el aire cede calor a éste, por lo tanto, la temperatura del aire disminuye y la temperatura del chícharo aumenta a través del tiempo de secado, hasta llegar a un equilibrio térmico. Sin embargo, en los primeros minutos de secado la temperatura del aire disminuye y se forma un pozo térmico, debido a que el chícharo se alimenta al secador a una temperatura más baja que la temperatura del aire de secado. Además, en los primeros minutos de secado no existe homogenización del lecho de chícharo pues en condiciones mínimas de fluidización únicamente se mueve la parte superior del lecho quedando estáticos los chícharos que están cercanos al distribuidor, pero a medida que transcurre el secado el lecho se homogeniza completamente, ayudando a alcanzar el equilibrio térmico en el secador.

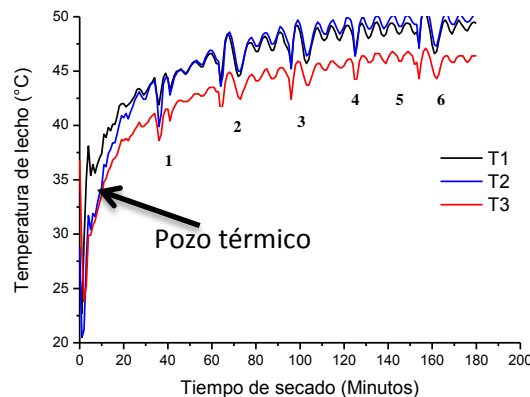
El tiempo para alcanzar el equilibrio térmico depende de la capacidad calorífica y conductividad térmica del chícharo, además de la temperatura y flujo volumétrico de aire de secado. Por esta razón Hatamipour y Mowla (2006) concluyen que la rapidez de secado en lecho fluidizado aumenta cuando en el secador se mezclan partículas inertes de menor tamaño y de alta conductividad térmica con los alimentos a secar.

En este trabajo no fue posible medir la temperatura interna del chícharo, pero se realizaron mediciones de la temperatura en el sistema sólido-aire, es decir, la temperatura del aire que atraviesa y está en contacto con la superficie del chícharo, a la cual se le conocemos como temperatura de lecho.

En la Figura 32 se observa que en el lecho disminuye su temperatura en los primeros 4 minutos, después de este tiempo se observa un incremento de la misma. Al comienzo del

secado la relación entre las lecturas de los termopares fue  $T_1 > T_2 > T_3$  debido a que el calor que cede el aire se distribuye en dirección axial del secador.

Después de un cierto tiempo de secado se esperaría que  $T_1 \approx T_2 \approx T_3$ , pero esto no sucedió ya que el encogimiento volumétrico del chícharo provocó que la altura de lecho disminuyera, dejando libre el termopar que tomó las lecturas de  $T_3$ , registrando éste únicamente la temperatura del aire que abandona el lecho. En la Figura 32, los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6 indican los tiempos en los que se detuvo el sistema para realizar las mediciones de las variables de respuesta cuantificadas este trabajo.

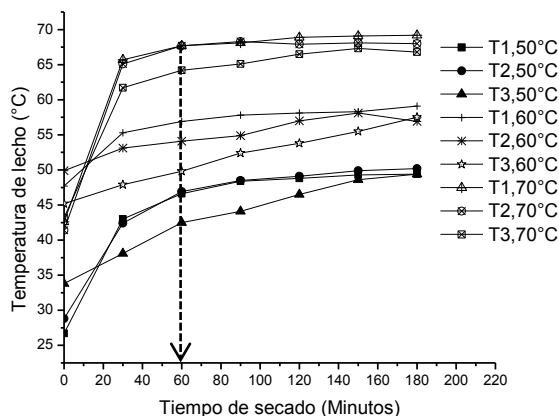


**Figura 32.** Temperatura del lecho a 50°C y relación L/D: 0.5.

En la Figura 33 se muestra un comparativo entre las temperaturas del lecho a cada 30 minutos, para una relación  $L/D = 0.50$ . Se observa que a 60 minutos (línea punteada) se llega al equilibrio térmico entre el aire y el chícharo. Además a 50°C y 70°C las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  tienen un comportamiento idéntico, no así la temperatura  $T_3$  en donde afectó el encogimiento volumétrico.

Es importante mencionar que para el caso 60°C en la temperatura del aire de secado, la relación entre las lecturas de los termopares fue  $T_3 < T_2 < T_1$  debido a que a esta temperatura se tuvo el menor encogimiento volumétrico (mayor pérdida de volumen) y la mayor densidad aparente, que en condiciones de operación dejaron libres los termopares que tomaron las lecturas de  $T_2$  y  $T_3$ . Dado que no hay diferencias considerables entre las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  del lecho, se tomó a  $T_2$  como temperatura representativa del lecho en

el secador y ésta será la temperatura que se tratará de estimar teóricamente. Comportamientos semejantes se encontraron para las otras dos relaciones L/D (Apéndice L).



**Figura 33.** Temperatura en el interior de lecho a diferentes temperaturas y relación L/D: 0.5.

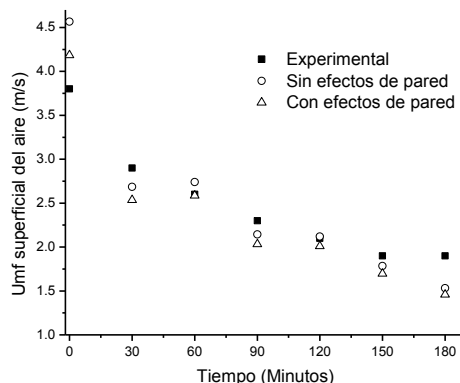
### 5.10 Velocidad mínima de fluidización teórica

La velocidad mínima de fluidización teórica obtenida a partir de los modelos con/sin efecto de pared, para el secado de chícharo a una relación L/D = 0.50 y 50°C, fue diferente al inicio del secado, por lo que se pensaría que estos efectos son importantes ya que el modelo con efectos de pared predice una velocidad mínima de fluidización superficial aire semejante al valor experimental. A medida que transcurre el secado, la relación  $D/d_p$  aumenta debido a que el chícharo disminuye su diámetro. Ambos modelos con y sin efectos de pared predicen valores semejantes para la velocidad mínima de fluidización, transcurridos 60 minutos de secado y estos valores están próximos a los resultados experimentales hasta los 150 minutos de secado. Las desviaciones absolutas promediadas fueron del 9.54% y 5.60% para los modelos sin/con efectos de pared, respectivamente.

Reichelt (1972) estudió la influencia del efecto de pared en la caída de presión de lechos empacados con partículas de diferentes formas y tamaños. Encontró que independientemente del número de Reynolds, para relaciones  $D/d_p > 12$  en lechos empacados de partículas esféricas, los efectos de pared pueden considerarse despreciables. En este trabajo  $10.54 < D/d_p < 13.2$ , por lo que en los primeros 30 minutos de secado los

efectos de pared pudieron ser importantes, después de este tiempo podrían considerarse despreciables (Figura 34).

El cálculo de la velocidad mínima de fluidización es sensible a la fracción vacía del lecho en condiciones mínimas de fluidización, por lo que es importante que  $\epsilon_{mf}$  se determine de manera experimental con la mayor precisión posible. Sin embargo, en este trabajo no fue posible hacer esta medición de manera directa, ya que se estimó teóricamente a partir de la ecuación 6, ello también pudo haber influido en los resultados que se muestran en la Figura 34.



**Figura 34.** Velocidad mínima de fluidización teórica sin/con efectos de pared a una  $L/D = 0.50$ .

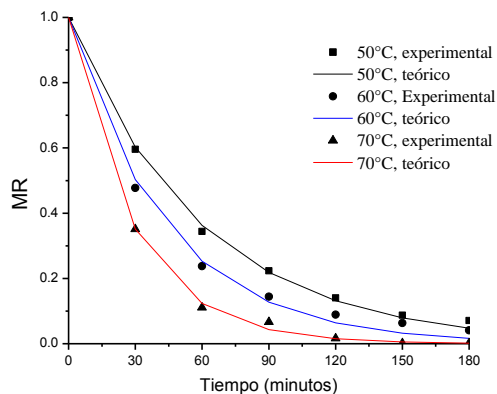
### 5.11 Coeficientes de difusión en chícharos y energía de activación

La Figura 35 muestra que los datos de MR se ajustan de buena manera al modelo exponencial, y que las constantes de velocidad de secado aumentan con la temperatura del aire de secado. La Tabla 12 proporciona las constantes de secado y los coeficientes de correlación obtenidos en el ajuste al modelo exponencial.

**Tabla 12.** Parámetros de ajuste del modelo exponencial para  $L/D = 0.50$ .

Temperatura, °C	K	R <sup>2</sup>
50	0.01691	0.998
60	0.02291	0.995
70	0.03488	0.999

Aplicando la ecuación (23) que es una ecuación tipo Arrhenius, se obtuvo una energía de activación 33.33kJ/mol y un valor de  $k_0 = 4027.9$  con coeficiente de correlación  $R^2 = 0.97$ . Por lo que la constante de velocidad de secado quedó expresada como  $Ln k = 8.3012 - \frac{4008.1}{T}$ .



**Figura 35.** Ajuste de datos experimentales con el modelo exponencial  $L/D: 0.50$ .

Resultados similares para las constantes de velocidad de secado fueron reportados en el 2003 por Senadeera et al., quienes estudiaron el secado de chícharos en lecho fluidizado y encontraron un valor de 45.13 kJ/mol para la energía de activación, utilizando el modelo exponencial.

En la Tabla 13 se muestran los valores de coeficientes de difusión efectivos obtenidos con los modelos con/sin encogimiento volumétrico. Los coeficientes de difusión estimados considerando encogimiento volumétrico resultaron menores al compararse con los obtenidos sin considerar este fenómeno. Lo anterior podría explicarse a partir de la

concentración volumétrica de la humedad en el chícharo, ya que al considerar el encogimiento volumétrico se asume un aumento de la concentración de humedad en el chícharo seco, lo que lleva a tener gradientes de concentración considerables desde el interior del chícharo al aire de secado. Por el contrario, al considerar que el chícharo no cambia de tamaño se asume una disminución de la concentración de la humedad en el chícharo seco por lo que los gradientes son menores.

En términos generales se puede decir que el modelo sin encogimiento sobrestima coeficientes de difusión efectivos. Resultados semejantes en orden de magnitud para los coeficientes de difusión han sido reportados por López (2003) quien estudio el secado de chícharo en lecho fluidizado y en lecho vibrofluidizado en su tesis de maestría. Por otra parte García (2012) reportó que el coeficiente de difusión efectivo para chícharo secado en capa delgada presenta desviaciones superiores al 100% comparado con los valores que obtuvo cuando utilizó la ecuación propuesta por Hawlader et al. (1991) que toma en cuenta el encogimiento volumétrico. De igual manera Zielinska et al. (2013), estudiaron el secado de chícharo en lecho fluidizado y lo comparó con otros métodos de secado. Reportó que los coeficientes de difusión efectivos son más grandes cuando no se toma en cuenta el encogimiento volumétrico.

**Tabla 13.** Coeficientes de difusión efectivos con/ sin encogimiento volumétrico  $L/D = 0.50$ .

Temperatura, °C	$D_{ef}, m^2/s$		% desviación absoluta
	Sin encogimiento	Con encogimiento	
50	$3.94 \times 10^{-10}$	$2.94 \times 10^{-10}$	0.35-1.11
60	$4.55 \times 10^{-10}$	$3.66 \times 10^{-10}$	0.25-0.64
70	$8.68 \times 10^{-10}$	$8.16 \times 10^{-10}$	0.32-0.38

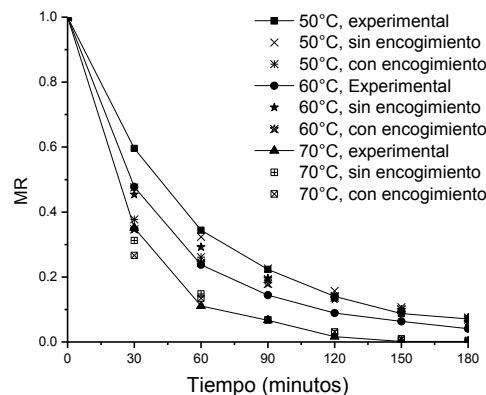
Mediante un modelo tipo Arrhenius se obtuvieron energías de activación de 36.42 kJ/mol (modelo sin encogimiento) y 46.82 kJ/mol (modelo con encogimiento) quedando las siguientes expresiones en forma lineal para el modelo sin/con encogimiento volumétrico:

$$\ln D_{ef} = -\frac{4381.4}{T} - 8.12 \quad R^2 = 0.99$$

$$\ln D_{ef} = -\frac{5633.6}{T} - 4.62 \quad R^2 = 0.90.$$

Valores similares de energías de activación para chicharos han sido reportados por Simal et al. (1996) quienes determinaron coeficientes de difusión efectivos de chícharo escaldado con vapor de agua, a temperaturas del aire de secado comprendidas entre 50°C-90°C. Encontraron energías de activación en el intervalo 24.7 -28.84 kJ/mol, y que el encogimiento volumétrico del chícharo no afectó el cálculo del coeficiente de difusión, pues obtuvieron resultados idénticos cuando solucionaron la ecuación de difusión de Fick (correspondiente a una esfera) mediante el método de diferencias finitas, y cuando hicieron uso de la solución en series de Fourier representada por la ecuación (21). Sin embargo, la limitante de estos autores fue considerar que la densidad del chícharo permaneció constante durante el secado, lo que posiblemente los llevó a obtener resultados similares en su trabajo. En general Zogzas et al. (1996) han investigado la energía de activación para productos agrícolas y reportan que éstas varían entre 12.7 a 110 kJ/mol, quedando ubicado en este intervalo los resultados reportados en este trabajo.

Los coeficientes de difusión efectivo reportados en la Tabla 13 permitieron reproducir los datos experimentales a las tres temperaturas de estudio (Figura 36).

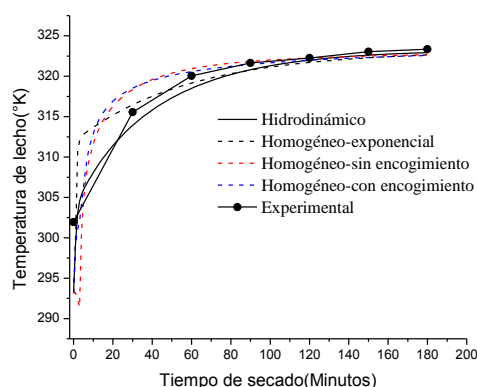


**Figura 36.** Modelos sin/con encogimiento volumétrico en los perfiles de MR para L/D = 0.50.



## 5.12 Temperatura teórica en el lecho de chícharos

La Figura 37 muestra los resultados obtenidos en la predicción de la temperatura del lecho a partir de las 4 combinaciones presentadas en la Tabla 5. Se observa que los modelos homogéneo-exponencial, homogéneo-sin encogimiento y homogéneo-con encogimiento, en los primeros 60 minutos, estiman temperaturas de lecho por arriba de los datos experimentales, lo cual era de esperarse pues el modelo homogéneo considera que los gradientes internos de temperatura en el sólido son despreciables comparado con los gradientes internos de humedad. Sin embargo el hecho de no reproducir la información experimental en los primeros minutos de secado, deja abierta la posibilidad que el chícharo tenga gradientes internos de temperaturas importantes, que hacen más lento su calentamiento. Además, el modelo hidrodinámico presentó un comportamiento más suave y semejante a los datos experimentales.



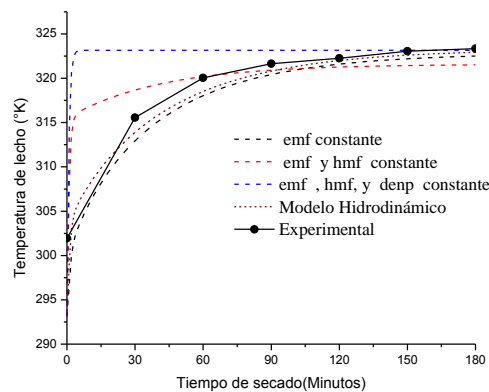
**Figura 37.** Predicción de la temperatura en lecho,  $L/D = 0.50$  y  $50^{\circ}\text{C}$ .

Las desviaciones promediadas para los resultados obtenidos con los modelos: hidrodinámico, homogéneo-exponencial, homogéneo-sin encogimiento y homogéneo-con encogimiento fueron 0.60%, 0.63%, 0.65% y 0.66%, respectivamente.

Debido a que el modelo hidrodinámico mostró mejor predicción en la temperatura de lecho, se realizó un estudio de las variables más importantes que lo constituyen para ver el efecto de las mismas en la solución de la ecuación diferencial correspondiente al balance de energía.

En el supuesto que el chícharo sea una partícula rígida e isotrópica y que durante el secado cambiara únicamente su densidad, nos lleva a pensar que la altura de lecho no presentaría cambios significativos, por lo que podríamos considerar que la fracción vacía ( $\epsilon_{mf} = 0.61$ ) en condiciones mínimas de fluidización fuese constante. Esto último lleva al modelo hidrodinámico a estimar temperaturas de lecho por debajo de los datos experimentales en los primeros 90 minutos de secado (Figura 38).

En el supuesto que la densidad aparente del chícharo cambie durante el tiempo de secado, pero que la altura de lecho y la fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización correspondiente no lo hicieran, al solucionar la ecuación diferencial del balance de energía se obtienen predicciones para la temperatura de lecho por arriba de los datos experimentales en los primeros 90 minutos, y por debajo en los últimos 90 minutos de secado (Figura 38).



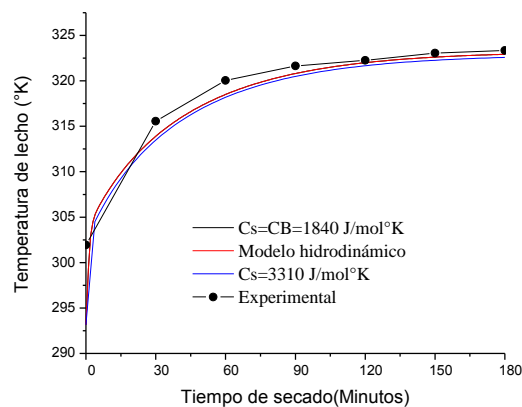
**Figura 38.** Efecto de la hidrodinámica en el modelo hidrodinámico-exponencial  $L/D = 0.50$  y  $50^\circ\text{C}$ .

En el supuesto que la densidad aparente del chícharo, fracción vacía y altura de lecho en condiciones mínimas de fluidización sean constantes, el modelo hidrodinámico predice que el lecho alcanza rápidamente el equilibrio térmico, lo que es razonable, pues en estas condiciones de fracción vacía ( $\epsilon_{mf} = 0.61$ ) en el lecho, el aire podría formar canalizaciones que no permiten contacto suficiente con el chícharo. Esto último implicaría que el aire no cede calor al chícharo y por ello la temperatura que se está midiendo es la temperatura del aire intersticial en el lecho, que no disminuye significativamente.

El considerar que la densidad aparente del chicharo, fracción vacía y altura de lecho en condiciones mínimas de fluidización cambian en el transcurso de secado, lleva a resolver el modelo hidrodinámico que como ya se mencionó, predice mejor la temperatura de lecho al compararse los resultados con los datos experimentales.

Otro parámetro importante es la capacidad calorífica del chicharo que en el balance de energía está relacionado con el contenido de humedad de la siguiente manera  $C_s = C_B + XC_w$ , en la que  $C_B$  es la capacidad calorífica (1840 J/kg) del chicharo seco,  $C_w$  es la capacidad calorífica (4184 J/kg) del agua líquida y  $C_s$  es la capacidad calorífica del chicharo húmedo con cierto contenido de humedad.

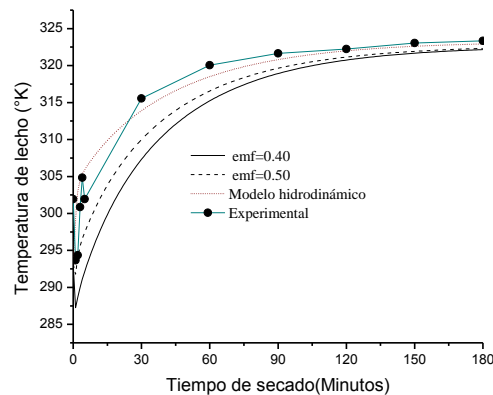
En la Figura 39 se observa que si no se considera el contenido de humedad del chicharo en el cálculo de capacidad calorífica del chicharo durante el secado, es decir, se supone que  $C_s = C_B$ , la predicción de la temperatura del lecho es semejante a la obtenida con el modelo hidrodinámico en la que considera que  $C_s = C_B + XC_w$ , además, los resultados también fueron semejantes cuando en la solución del balance de energía del secador, se utilizó una capacidad calorífica para el chicharo húmedo de  $C_s = 3310 \text{ J/kg}$  (Geankoplis, 1998).



**Figura 39.** Efecto de la capacidad calorífica del chicharo en el modelo hidrodinámico-exponencial  $L/D = 0.50$  y  $50^\circ\text{C}$ .

Una observación importante en la estimación de la temperatura de lecho, es no haber obtenido éxito de que el modelo homogéneo y modelo hidrodinámico permitieran

reproducir el pozo térmico experimental observado en las gráficas de la Figura 32 en los primeros 5 minutos de secado. Por ello se varió un último parámetro, la fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización, desde 0.61 hasta 0.40. Este último valor de fracción vacía nos lleva a pensar en que durante el tiempo de secado el chícharo disminuye su tamaño considerablemente por lo que la relación diámetro de lecho a diámetro de partícula aumenta, disminuyendo la fracción vacía del lecho del lecho.



**Figura 40.** Efecto de la fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización en el modelo hidrodinámico-exponencial  $L/D = 0.50$  y  $50^{\circ}\text{C}$ .

En la Figura 40 se muestra que valores cercanos a 0.40 de fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización es posible reproducir el pozo térmico, pues esto aumenta la velocidad superficial de las partículas, reduciendo así el tiempo de residencia en el secador.

## **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES**

---

En este capítulo se presentan las conclusiones correspondientes al trabajo, y algunas expectativas a futuro que puede realizarse para mejorar los resultados obtenidos.

---

## 6.1 Conclusiones

- El encogimiento volumétrico es fenómeno que surge debido al secado de alimentos vegetales fibrosos, por lo tanto, el encogimiento volumétrico y secado de chícharo modificaron la hidrodinámica del secador, disminuyendo la caída de presión en el secador un 85%, la altura de lecho en 45% y la velocidad mínima de fluidización en 50%.
- La hidrodinámica y el secado presentaron una relación importante, pues a mayor tamaño y contenido de humedad, la velocidad superficial, la caída de presión y la altura mínima de fluidización tuvieron los valores más altos.
- La velocidad mínima de fluidización estimada después de los primeros 30 minutos, considerando los efectos de pared, tuvo menor la desviación absoluta promedio respecto a los valores obtenidos cuando no se consideraron los efectos de pared, confirmando la existencia de estos en este tiempo de secado.
- Los coeficientes de difusión efectivos estimados con el modelo sin encogimiento fueron mayores a los obtenidos con el modelo que consideró el encogimiento volumétrico, pero del mismo orden de magnitud.
- El modelo homogéneo no predijo de buena manera los datos experimentales en los primeros 90 minutos de secado, posiblemente porque los gradientes internos de temperatura en el chícharo fueron importantes.
- El modelo hidrodinámico utilizado en este trabajo estimó de mejor manera los datos experimentales de la temperatura de lecho cuando se comparó con los resultados del modelo homogéneo, pero no así los perfiles de humedad cuyos valores siempre fueron menores que los datos experimentales.
- El contenido de humedad en el chícharo después de 180 minutos de secado cuando se operó el secador a las condiciones de velocidad mínima de fluidización fue ligeramente mayor que cuando se operó a las condiciones de velocidad mínima de fluidización correspondiente a  $t=0$ . Lo anterior indica la posibilidad de establecer un control automático de aire y con esto disminuir costos energéticos en la operación.

## 6.2 Expectativas

- Realizar mediciones en línea (de manera automática) de la caída presión en el secador haciendo uso de transductores de presión, y cuantificar la masa en el lecho en el transcurso del secado con una balanza digital para mejorar el cálculo del contenido de humedad, lo anterior mejorará la estimación de la fracción vacía mínima de fluidización.
- Obtener las isotermas de adsorción para establecer modelos que permitan estimar la humedad de equilibrio a diferentes temperaturas así como también los calores de adsorción. Esto último ayudará a complementar el modelo homogéneo en el cálculo del calor neto de desorción.
- Complementar el estudio de secado de chícharo manteniendo constantes las condiciones mínimas de fluidización obtenidas a cada tiempo según este trabajo, pensando en la posibilidad de controlar los requerimientos de flujo de aire mediante un control automático.

### 6.3 Bibliografía

- Aguilera, J. M., & Stanley, D. W. *Microstructural principles of food processing and engineering*. Springer. 1999.
- Al-Dabagh A.M. *The Influence of Air Distributors on the Performance of Fluidized Bed Heat pipe Heat Exchanger*. Journal Technology.2005.
- Anaya, S. I. Contribución al estudio de secado en chícharo (*Pisum sativum*), en equipo de lecho fluidizado. Tesis de maestría. ENCB-IPN. México. 1988.
- Association of Official Analytical Chemist 1990 Official Methods of Analysis. 15 th edition. AOAC, Arlington.
- Bauman, I., Bobić, Z., & Ukrainczyk, M. *Time and speed of fruit drying on batch fluid-beds*. Sadhana, 30(5), 687-698. 2005
- Brennan, J. G.; Butters, J.R.; Cowell, N.D.; Lilly, A. *Deshidratación. Las operaciones de la ingeniería en alimentos*. Acribia. Zaragoza. (1980).
- Camarena. M. Y. Mercado.F.J. *Análisis de la cinética del secado por lecho fluidizado de chícharos (Pisum sativum) mediante el modelo de Peleg. IX congreso de ciencia de los alimentos y Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Guanajuato. 2007.*
- Cyrus Sevey, G. (1911). *Peas and Pea Culture*,. New York: Orange Judd Company.
- Delebarre, A., Morales, J. M., & Ramos, L. *Influence of the bed mass on its fluidization characteristics*. Chemical Engineering Journal, 98(1), 81-88. 2004.
- Einfeld, B., & Schnitzlein, K. The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds. *Chemical Engineering Science*, 56(14), 4321-4329. 2001.
- Ergun, S., & Orning, A. A. *Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds*. Industrial & Engineering Chemistry, 41(6), 1179-1184. 1949.
- Flores, N.L. Evaluación de la calidad bioquímica de la Pimienta Gorda (Pimienta dioica L. Merrill) deshidratada con ciclos de atemperado. Tesis de maestría. ENCB-IPN. México. 2009.
- Foust, A. Principios de operaciones unitarias. Primera edición. Editorial Continental. México. 1979.
- García C.I. *Caracterización de la deshidratación de chícharo por el método de capa delgada: Coeficientes de transferencia, cambios térmicos y morfológicos*. Tesis para



obtener el grado de maestría en ciencias con especialidad en alimentos. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México. 2012.

- Geankoplis, C. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. p. 579-580. 1998.
- Geldart, D. *Powder Technology*. 1973.
- Geldart, D., & Baeyens, J. (1985). *The design of distributors for gas-fluidized beds*. *Powder Technology*, 42(1), 67-78.
- Hatamipour, M. S., & Mowla, D. *Drying behaviour of maize and green peas immersed in fluidized bed of inert energy carrier particles*. *Food and bioproducts processing*, 84(3), 220-226. 2006.
- Hawlader, M. N. A., Uddin, M. S., Ho, J. C., & Teng, A. B. W. (1991). *Drying characteristics of tomatoes*. *Journal of Food Engineering*, 14(4), 259-268.
- Henderson, S. Pabis; *Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient*. *Journal of Agricultural Research Engineering*. 85-89.1961.
- Hirschfelder, J. O., Curtiss, C. F., & Bird, R. B. *Molecular theory of gases and liquids*. New York: Wiley. 26. 1954.
- Honarvar, B., Mowla, D., & Safekordi, A. A. *Experimental and Theoretical Investigation of Drying of Green Peas in a Fluidized Bed Dryer of Inert Particles Assisted by Infrared Heat Source*. *Iran. J. Chem. Chem. Eng. Vol*, 32(1). 2013.
- Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B., & Marinou-Kouris, D. (2003). *Drying kinetics of some vegetables*. *Journal of Food engineering*, 59(4), 391-403.
- Kunii, D. *Fluidization Engineering*. 1991.
- Kunii, D.; Levenspiel, O. *Fluidization Engineering*. Ed. Butterworth-Heinemann. 1-82, p.105-106.1991.
- Leva M. *Fluidization*. New York: Mc Graw Hill. 1959
- Lewis, W. K. *The Rate of Drying of Solid Materials*. *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432. 1921.
- Lewis, W. K. *The Rate of Drying of Solid Materials*. *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432. 1921.
- Li, Z. Y., Ye, J. S., Wang, H. T., & Wang, R. F. *Drying characteristics of green peas in fluidized beds*. *Transactions of the TSTU*, 12(3), 668-675.2006

- López, E. Secado de chícharo (*Pisum sativum*), por lotes con ciclos de atemperado. Tesis de maestría. ENCB-IPN. México. 2003.
- Lozano, J.E.; Urbican, M.J.; Rotstein, E. *Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs and changing moisture content*. Journal of Food Science. 48, 1497-1502. 1983.
- Madiouli, J., Lecomte, D., Nganya, T., Chavez, S., Sghaier, J., & Sammouda, H. *A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials*. Drying Technology, 25(4), 621-628. 2007.
- Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). *Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review*. Journal of Food Engineering, 61(3), 373-386.
- Mayor, L., Sereno A.M. *Modelling Shrinkage during convective drying of food material: a review*. Journal of food Engineering. 61. 373-386. 2003.
- Medeiros, G. L., & Sereno, A. M. *Physical and transport properties of peas during warm air drying*. Journal of food engineering, 21(3), 355-363.1994.
- Mehta, D., & Hawley, M. C. *Wall effect in packed columns*. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 8(2), 280-282. 1969.
- *Molecular theory of gases and liquids*. J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss, and R. B. Bird. Wiley, New York, 1954.
- Montillet, A., Akkari, E., & Comiti, J. *About a correlating equation for predicting pressure drops through packed beds of spheres in a large range of Reynolds numbers*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 46(4), 329-333. 2007.
- Mujumdar, A. S. (Ed.). *Handbook of industrial drying*. CRC Press. 2006.
- Park, K. J. *Diffusional model with and without shrinkage during salted fish muscle drying*. Drying Technology, 16(3-5), 889-905. 1998.
- Pyle, P.H. *Some effects of particle shape of fluidization characteristics*. 1950.
- Quiminet. (2 de Diciembre de 2011). Quiminet.com. Recuperado el 17 de Mayo de 2014, de <http://www.quiminet.com/articulos/mejore-su-salud-y-prevengana-enfermedades-a-base-de-la-ingesta-de-chicharo-2644233.htm>.

- Santacruz-Vázquez, C., Santacruz-Vázquez, V., & Huerta-Espinosa, V. M. *Evaluación del encogimiento y deformación de uvas durante su deshidratación por fluidización usando el análisis fractal*. Superficies y Vacío (23). 2010
- Senadeera, W., Bhandari, B. R., Young, G., & Wijesinghe, B. *Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying*. Journal of Food Engineering, 58(3), 277-283.2003.
- Senadeera, W., Wijesinghe, B., Young, G., & Bhandari, B. *Fluidization characteristics of moist food particles*. International Journal of food engineering,2(1). 2006.
- Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J., & Rosselló, C. *Drying models for green peas*. Food Chemistry, 55(2), 121-128. 1996.
- Simsek, S., Tulbek, M. C., Yao, Y., & Schatz, B. *Starch characteristics of dry peas grown in the USA*. Food chemistry, 115(3), 832-838.2009.
- Souraki, B. A., & Mowla, D. (2008). Axial and radial moisture diffusivity in cylindrical fresh green beans in a fluidized bed dryer with energy carrier: Modeling with and without shrinkage. *Journal of food engineering*, 88(1), 9-19.
- Telis-Romero, J., & Sobral, P. J. D. A. *Caída de presión en lecho fijo de cubos de papa, remolacha y zanahoria considerando encogimiento*. Food Science and Technology (Campinas), 23, 110-115. 2003.
- Treybal, Robert. *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. Editorial Mc Graw Hill. México.1983.
- Zahed, A. H., & Epstein, N. (1992). *Batch and continuous spouted bed drying of cereal grains: the thermal equilibrium model*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 70(5), 945-953.
- Zielinska, M., Zapotoczny, P., Alves-Filho, O., Eikevik, T. M., & Blaszcak, W. *A multi-stage combined heat pump and microwave vacuum drying of green peas*. Journal of Food Engineering, 115(3), 347-356.2013.
- Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. *Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs*. Drying technology, 14(10), 2225-2253. 1996.

## **APÉNDICES**

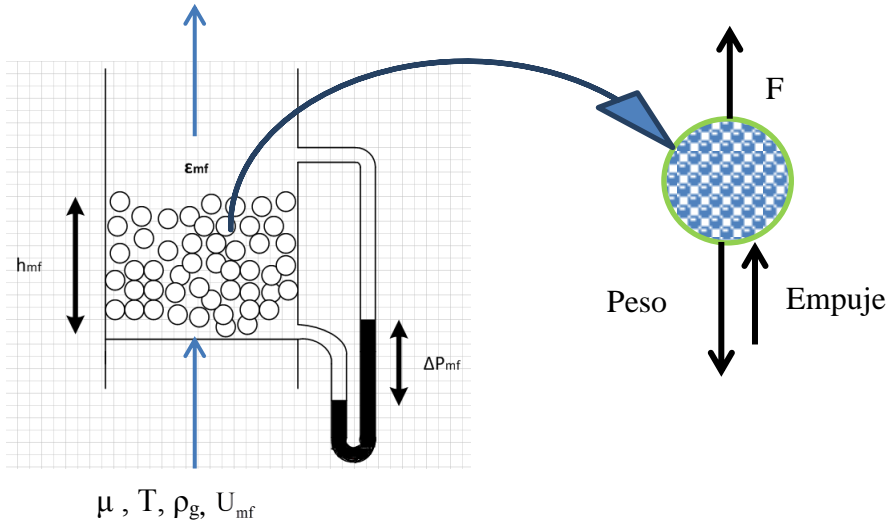
---

En este apartado se presentan los detalles correspondientes a los modelos utilizados para: la estimación de coeficientes de difusión efectivos, estimación de la temperatura de lecho y la velocidad superficial en condiciones mínimas de fluidización con y sin efectos de pared, así como los datos experimentales de las variables de respuestas.

---

## APÉNDICE A. Expresión matemática para la velocidad mínima de fluidización

La Figura A<sub>1</sub> muestra un lecho de partículas sólidas en condiciones mínimas de fluidización en las que el peso de la partícula debe ser contrarrestado con la fuerza (F) y el empuje ejercido por el fluido que asciende.



**Figura A1** Fuerzas presentes en un lecho de partículas en condiciones mínimas de fluidización con aire.

El peso de las partículas en condiciones mínimas de fluidización en el interior de lecho está dado por la ecuación A<sub>1</sub>.

$$(1 - \varepsilon_{mf}) A \cdot g \cdot \rho_p \cdot h_{mf} \quad (A_1)$$

El balance de fuerzas indica que  $F + Empuje = Peso$ , por lo tanto la fuerza para suspender las partículas es equivalente a la pérdida de presión del fluido debido a las partículas del lecho multiplicada por el área de sección transversal.

$$\Delta P A = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g h_{mf} A \quad (A_2)$$

La caída de presión por unidad de longitud de lecho en condiciones mínimas de fluidización está dada por la ecuación A<sub>3</sub>.

$$\frac{\Delta P}{h_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g \quad (A_3)$$

El rozamiento total por unidad de área es igual a la suma de dos tipos de fuerza: fuerzas de rozamiento viscoso y fuerzas de inercia. Estas fuerzas se engloban en la ecuación A<sub>5</sub> reportada por Ergun y Orning (1949), y permite calcular la pérdida friccional a través de lechos empacados fijos. Esta ecuación hace las siguientes consideraciones:

- Las partículas están dispuestas al azar, sin orientaciones preferentes.
- Todas las partículas tienen el mismo tamaño y forma.
- Los efectos de pared son despreciables.

La pérdida de energía a través de los lechos empacados es equivalente a la caída de presión en el lecho de partículas:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu \cdot U_{mf}}{(\varepsilon)^3 (\phi \cdot d_p)^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon) U_{mf}^2}{(\varepsilon)^3 \phi \cdot d_p} \quad (A_4)$$

Fuerzas viscosas                      Fuerzas de inercia

Sin embargo, en las condiciones mínimas de fluidización existe la transición de un lecho fijo a un lecho fluidizado, por lo que la caída de presión en esta transición está dada por:

$$\frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu \cdot U_{mf}}{(\varepsilon_{mf})^3 (\phi \cdot d_p)^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_{mf}) U_{mf}^2}{(\varepsilon_{mf})^3 \phi \cdot d_p} = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (A_5)$$

Si sustituimos el diámetro de partículas en términos del encogimiento volumétrico  $d_p = S_b^{1/3} d_{p0}$ , la ecuación A<sub>5</sub> queda expresada en la ecuación A<sub>6</sub>.

$$\frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu \cdot V_{mf}}{(\varepsilon_{mf})^3 (\phi S_b^{1/3} d_{p0})^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_{mf}) V_{mf}^2}{(\varepsilon_{mf})^3 \phi S_b^{1/3} d_{p0}} = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (A_6)$$

Si consideramos los efectos de pared en un lecho de partículas se puede obtener la ecuación modificada de Ergun (Metha y Hawley, 1969). Para ello establecemos un radio hidráulico de flujo para el aire en el interior del lecho de partículas de diámetro  $d_p$  y fracción vacía de lecho fijo  $\varepsilon$ .

$$R_h = \frac{\frac{\text{Volumen vacío}}{\text{Volumen de lecho}}}{\frac{\text{Área de partículas}}{\text{Volumen de lecho}} + \frac{\text{Área mojada}}{\text{Volumen de lecho}}} \quad (\text{A}_7)$$

Sustituyendo las relaciones correspondientes:

$$R_h = \frac{\varepsilon}{\frac{6}{d_p}(1-\varepsilon) + \frac{4}{d_p}} \quad (\text{A}_8)$$

Simplificando y reordenando tenemos:

$$R_h = \frac{\varepsilon d_p}{6(1-\varepsilon) \left[ 1 + \frac{4d_p}{6(1-\varepsilon)D} \right]} \quad (\text{A}_9)$$

Haciendo el siguiente cambio de variable  $M = 1 + \frac{4d_p}{6(1-\varepsilon)D}$  es posible escribir el radio hidráulico de flujo como:

$$R_h = \frac{\varepsilon d_p}{6(1-\varepsilon)M} \quad (\text{A}_{10})$$

A partir del análisis del perfil de velocidad superficial de un fluido a través de un tubo circular se tiene reportado que en régimen laminar la caída de presión está dada por:

$$U = \frac{\Delta P \varepsilon R_h^2}{2\mu L} \quad (\text{A}_{11})$$

Sustituyendo el radio hidráulico y simplificando tenemos:

$$U = \frac{\Delta P \varepsilon}{2\mu L} \left( \frac{\varepsilon d_p}{6(1-\varepsilon)M} \right)^2 \quad (\text{A}_{12})$$

$$U = \frac{\Delta P \varepsilon^3 d_p^2}{72\mu L (1-\varepsilon)^2 M^2} \quad (\text{A}_{13})$$

El número 72 se sustituye por 150, constante de ajuste que ha correlacionado un gran número de datos experimentales, por lo tanto:

$$U = \frac{\Delta P \varepsilon^3 d_p^2}{150\mu L (1-\varepsilon)^2 M^2} \quad (\text{A}_{14})$$

Despejando la caída de presión por longitud de lecho, se obtiene:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu L (1-\varepsilon)^2 M^2 U}{\varepsilon^3 d_p^2} \quad (\text{A}_{15})$$

Para el régimen turbulento, se parte de la definición del coeficiente de fricción

$$f = \frac{R_h}{2L} \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho \left(\frac{U}{\varepsilon}\right)^2} \quad (\text{A}_{16})$$

Sustituyendo el radio hidráulico y simplificando, se obtiene:

$$f = \frac{\varepsilon d_p}{6(1-\varepsilon)M} \frac{\Delta P}{L} \frac{U^2}{\rho \frac{U^2}{\varepsilon^2}} \quad (\text{A}_{17})$$



$$f = \frac{\varepsilon d_p}{6(1-\varepsilon)ML} \frac{\varepsilon^2 \Delta P}{\rho(U)^2} \quad (\text{A}_{18})$$

Despejando la caída de presión por longitud de lecho, se obtiene:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{6f(1-\varepsilon)M\rho(U)^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (\text{A}_{19})$$

El número  $6f$  se sustituye por 1.75 constante de ajuste que ha correlacionado un gran número de datos experimentales, por lo tanto:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1.75(1-\varepsilon)M\rho(U)^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (\text{A}_{20})$$

En general la caída de presión a través de un lecho de partículas está dado por la ecuación siguiente ecuación A<sub>8</sub> en la que el primer término es válida en régimen laminar y el segundo en régimen turbulento.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu L(1-\varepsilon)^2 M^2 U}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon)M\rho(U)^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (\text{A}_{21})$$

La ecuación A<sub>22</sub> representa la transición de un lecho fijo a un lecho fluidizado tomando en cuenta los efectos de pared.

$$\frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu \cdot U_{mf}}{(\varepsilon_{mf})^3 (\phi \cdot d_p)^2} M^2 + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_{mf}) U_{mf}^2}{(\varepsilon_{mf})^3 \phi \cdot d_p} M = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (\text{A}_{22})$$

## A<sub>1</sub>. Parámetros para calcular $U_{mf}$ con y sin efectos de pared

Las ecuaciones  $A_5$  y  $A_{22}$  permiten estimar la velocidad superficial del aire en condiciones mínimas de fluidización sin/con efectos de pared. Estas ecuaciones dependen del diámetro de partícula, fracción vacía y de las propiedades físicas del fluido (densidad y viscosidad). Las dos primeras se obtienen de manera experimental pero las propiedades físicas del aire se estimaron a partir de la temperatura en el centro del lecho ( $T_2$ ).

La densidad del aire ( $\text{g/cm}^3$ ) se determinó a partir de la ecuación  $A_{10}$  en la que  $P$  es la presión de operación que en nuestro caso fue aproximadamente de 0.80 atm.

$$\rho_g = \frac{0.3514 * P}{T} \quad (A_{10})$$

La viscosidad dinámica ( $\text{g/cm.s}$ ) se determinó a partir de las constantes de Lennard- Jones, y los valores de  $\Omega$ . Los parámetros  $KT/\epsilon$  se tomaron de los datos reportados por Hirschfelder et al. (1954), estos datos se ajustaron a un modelo de 5 parámetros en Origin 8.0 para evaluar directamente  $\Omega$  como una función de la temperatura.

$$\Omega = 0.59254 \exp\left(-\left(\frac{KT}{\epsilon}\right)/7.35103\right) + 2.64596 \exp\left(-\left(\frac{KT}{\epsilon}\right)/0.55527\right) + 0.63815 \quad R^2 = 0.998$$

$$\mu = 0.000026693 \frac{\sqrt{28.84 * T}}{(3.617)^2 \Omega} \quad (A_{11})$$

## APÉNDICE B. Modelos para ajustar el perfil de humedad

### B<sub>1</sub>. Modelo cinético

La humedad de las partículas durante el secado por convección en términos de la constante de velocidad está dada por la ecuación  $B_1$ .

$$-\frac{dX}{dt} = k(X - X_e) \quad (B_1)$$

Integrado la ecuación diferencial B<sub>1</sub> considerando que el contenido de humedad de equilibrio es constante, tenemos la ecuación B<sub>11</sub>.

$$\ln\left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}\right) = -kt \quad (\text{B}_{11})$$

Donde se sustituye  $MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$  para obtener la ecuación B<sub>12</sub> que se conoce como modelo exponencial.

$$MR = \exp(-kt) \quad (\text{B}_{12})$$

## B<sub>2</sub>. Modelo sin encogimiento volumétrico

A partir de un balance de humedad en una partícula de geometría esférica en dirección radial y considerando válida la ley de Fick se obtiene la siguiente ecuación B<sub>2</sub>.

$$\frac{\partial(\rho_s X)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 D_{ef} \frac{\partial(\rho_s X)}{\partial r} \right\} \quad (\text{B}_2)$$

En donde D<sub>ef</sub> es el coeficiente de difusión efectivo que engloba difusión molecular, difusión líquida a través de los poros del sólido, difusión del vapor en el sólido, flujo Knudsen y todos los factores que afectan las características de secado.

Esta ecuación está sujeta a los siguientes supuestos:

- Encogimiento volumétrico despreciable, es decir, el radio de la partícula es constante.
- La difusión de la humedad interna controla el proceso de secado.
- La densidad del sólido y el coeficiente de difusión efectivo son constantes.
- La temperatura de las partículas es constante.

Simplificando se obtiene la siguiente ecuación B<sub>21</sub>.

$$\frac{\partial(X)}{\partial t} = D_{ef} \left[ \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r}\right) \frac{\partial X}{\partial r} \right] \quad (\text{B}_{21})$$

Esta ecuación diferencial se puede resolver a partir de las siguientes condiciones iniciales y de frontera que consideran simetría (I) y equilibrio entre la humedad del sólido y la humedad del aire (II). Las condiciones de frontera están relacionadas con el hecho de considerar despreciable fenómenos externos de transporte de masa.

$$\begin{aligned}
 C.Inicial. \quad t=0 \quad X &= X_0 \quad 0 < r < R_p \\
 C.Frontera I \quad t > 0 \quad r=0 \quad \frac{\partial(X)}{\partial r} &= 0 \\
 C.Frontera II \quad t > 0 \quad r=R_p \quad X &= X_e
 \end{aligned}$$

Resello et al. (1992) utilizaron la siguiente solución analítica de la ecuación diferencial B<sub>21</sub> en términos de la serie de Fourier (Ecuación B<sub>22</sub>).

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{R_p^2}\right) \quad (B_{22})$$

### B<sub>3</sub>. Modelo con encogimiento volumétrico

Partiendo del balance de humedad correspondiente a una geometría esférica, Park (1998) sustituyó la relación  $\rho_s = \frac{m_{ss}}{V}$  para obtener la ecuación B<sub>3</sub>.

$$\frac{\partial\left(\frac{m_{ss}}{V} X\right)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 D_{ef} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{m_{ss}}{V} X \right) \right\} \quad (B_3)$$

Dado que la masa seca y el coeficiente de difusión efectivo se consideran constantes, la ecuación B<sub>3</sub> se puede simplificar a B<sub>31</sub>.

$$\frac{\partial\left(\frac{X}{V}\right)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 D_{ef} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{X}{V} \right) \right\} \quad (B_{31})$$

Park (1998) dejó la ecuación B<sub>31</sub> en términos de volumen pues tenía disponible datos experimentales de volumen para ejotes, pero en nuestro caso tenemos datos de encogimiento volumétrico, razón por la cual hacemos la siguiente sustitución  $V = S_b V_0$

$$\frac{\partial \left( \frac{X}{V_0 S_b} \right)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 D_{ef} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{X}{V_0 S_b} \right) \right\} \quad (\text{B}_{32})$$

Dado que  $V_0$  es constante, la ecuación B<sub>32</sub> se puede escribir como B<sub>33</sub>:

$$\frac{\partial \left( \frac{X}{S_b} \right)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 D_{ef} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{X}{S_b} \right) \right\} \quad (\text{B}_{33})$$

Al igual que Park (1998) hacemos un cambio de variable de la siguiente manera  $Z = \frac{X}{S_b}$

$$\frac{\partial(Z)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 D_{ef} \frac{\partial}{\partial r} (Z) \right\} \quad (\text{B}_{34})$$

Desarrollando la derivada parcial nos queda finalmente la ecuación B<sub>35</sub>.

$$\frac{\partial(Z)}{\partial t} = D_{ef} \left[ \frac{\partial^2 Z}{\partial r^2} + \left( \frac{2}{r} \right) \frac{\partial Z}{\partial r} \right] \quad (\text{B}_{35})$$

La ecuación diferencia B<sub>35</sub> es semejante a la ecuación diferencial B<sub>21</sub> obtenida para el caso que no se considera el encogimiento volumétrico, por lo que se pueden resolver a partir de las siguientes condiciones iniciales y de frontera que consideran simetría (I) y equilibrio entre la humedad del sólido y la humedad del aire (II).

$$\begin{aligned} \text{C.I. } t = 0 \quad Z = Z_0 = \frac{X_0}{S_{b0}} \quad 0 < r < R_p \\ \text{C.F I} \quad t > 0 \quad r = 0 \quad \frac{\partial(Z)}{\partial r} = 0 \\ \text{C.F II} \quad t > 0 \quad r = R_p \quad Y = Ze = \frac{X_e}{S_{be}} \end{aligned}$$

La solución analítica está dada por la siguiente serie de Fourier (Ecuación B36).

$$\frac{Z - Ze}{Zo - Ze} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{R^2}\right) \quad (\text{B}_{36})$$

Donde  $R_p$  es el radio promedio de partícula, calculado a partir de los datos experimentales:

$$R_p = \frac{\int_0^t r dt}{\int_0^t dt} \quad (\text{B}_3)$$

## APÉNDICE C. Modelos térmicos del secador

### C<sub>1</sub>. Modelo homogéneo

El modelo homogéneo para secado en lecho fluidizado fue propuesto por Zahed y Epstein en 1992, tal modelo está sujeto a las siguientes consideraciones:

- El sólido tiene una esfericidad próxima a la unidad, es isotrópico y homogéneo.
- El encogimiento volumétrico es despreciable, y sus propiedades físicas se mantienen constante durante el tiempo de secado.
- La difusión interna controla el proceso de secado y las resistencias externas al transporte de masa son despreciables, así como equilibrio entre la humedad de la superficie del sólido y humedad del aire.
- La difusión de la humedad se lleva a cabo en dirección radial y que los gradientes internos de temperatura en el sólido son despreciables.
- El secador es esencialmente adiabático, es decir, el secador no tiene pérdidas de calor con los alrededores.
- El arrastre de partículas debido al flujo de aire es despreciable.
- Los sólidos están lo suficientemente mezclados y que la altura de lecho es lo suficiente para que exista equilibrio térmico entre los sólidos y el aire.

Los balances de materia y energía correspondientes al secador están dados por las siguientes ecuaciones C<sub>1</sub> y C<sub>11</sub>.

**Balance de humedad:**

$$\dot{m}_A (Y - Y_1) = -m_B \frac{dX}{dt} \quad (C_1)$$

**Balance de energía:**

$$m_B (C_B + XC_w) \frac{dT_l}{dt} = \dot{m}_A (C_A + Y_1 C_v) (T_1 - T_l) - \Delta H_{evap} \dot{m}_A (Y - Y_1) \quad (C_{11})$$

El balance de humedad y el balance de energía están sujetos a la siguiente condición inicial

$$t = 0 \quad T = T_0 \quad X = X_0$$

**C<sub>12</sub>. Parámetros del modelo homogéneo**

Los parámetros más importantes para la solución de los modelos se presentan en las siguientes Tabla C<sub>1</sub>.

**Tabla C<sub>1</sub>.** Parámetros importantes del modelo homogéneo.

Parámetro	Expresión matemática
$C_A$	$1009.26 - 4.043 \times 10^{-2} (T_l - 273.15) + 6.1759 \times 10^{-4} (T_l - 273.15)^2 - 4.097 \times 10^{-7} (T_l - 273.15)^3$
$C_V$	$1883 - 1.6737 \times 10^{-1} (T_l - 273.15) + 8.4386 \times 10^{-4} (T_l - 273.15)^2 - 2.6966 \times 10^{-7} (T_l - 273.15)^3$
$C_B$	1840
$C_W$	$2822.3 - 1.1828 \times 10^1 T_l - 3.5043 \times 10^{-2} (T_l)^2 - + 3.601 \times 10^{-5} (T_l)^3$
$H_V$	$462 (T_l)^2 \left[ \frac{6887}{(T_l)^2} - \frac{5.31}{T_l} \right]$
$\dot{m}_A$	0.382

Para el caso particular del sacado a 50°C para las diferentes relaciones L/D se utilizan los parámetros indicados en la Tabla C<sub>11</sub>.

**Tabla C11.** Parámetros del modelo homogéneo para el caso de las diferentes relaciones L/D y 50°C.

Relación L/D	$Y_1$	$m_B$	$T_0$	$X_0$
0.5	0.003654	0.06096	293.15	2.2884
1	0.003654	0.1487	293.15	2.2884
1.5	0.003654	0.2452	293.15	2.2884

## C<sub>2</sub>. Modelo hidrodinámico

A partir de la definición de la humedad en base seca para las partículas en el interior del secador (Ecuación C<sub>2</sub>).

$$X = \frac{m_p - m_B}{m_B} \quad (C_2)$$

La masa de las partículas en términos de la humedad de las mismas está dada por C<sub>21</sub>.

$$m_p = m_{ss} (1 + X) \quad (C_{21})$$

En condiciones mínimas de fluidización la masa de partículas en el interior del secador está dada por C<sub>22</sub>.

$$m_p = (1 - \varepsilon_{mf}) A \rho_p h_{mf} \quad (C_{22})$$

Dado que la masa en el interior del secador es la misma independientemente si se determina en términos de la humedad o a partir de las condiciones mínimas de fluidización, por lo que se obtiene C<sub>23</sub>.

$$(X + 1)m_B = (1 - \varepsilon_{mf}) \rho_p A \cdot h_{mf} \quad (C_{23})$$

Derivando la ecuación C<sub>23</sub> respecto al tiempo y considerando que el área transversal del secador es constante, obtenemos C<sub>24</sub>.

$$m_B \frac{dX}{dt} = A \left[ h_{mf} \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \frac{d\rho_p}{dt} - h_{mf} \cdot \rho_p \frac{d\varepsilon_{mf}}{dt} + \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot \frac{dh_{mf}}{dt} \right] \quad (C_{24})$$



La derivada del contenido de humedad respecto al tiempo puede escribirse en términos de las variables hidrodinámicas (Ecuación C<sub>25</sub>).

$$\frac{dX}{dt} = \frac{A}{m_B} \left[ hmf \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \frac{d\rho_p}{dt} - hmf \cdot \rho_p \frac{d\varepsilon_{mf}}{dt} + \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot \frac{dhmf}{dt} \right] \quad (C_{25})$$

Sustituyendo C<sub>25</sub> en C<sub>1</sub> se puede obtener C<sub>26</sub> para el contenido de humedad del aire a la salida del secador.

$$Y = -\frac{m_B}{m_A} \left[ hmf \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \frac{d\rho_p}{dt} - hmf \cdot \rho_p \frac{d\varepsilon_{mf}}{dt} + \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot \frac{dhmf}{dt} \right] \left( \frac{A}{m_B} \right) + Y_1 \quad (C_{26})$$

La ecuación C<sub>26</sub> es un aporte de este trabajo y forma parte del *modelo hidrodinámico*.

### C<sub>21</sub>. Parámetros del modelo hidrodinámico

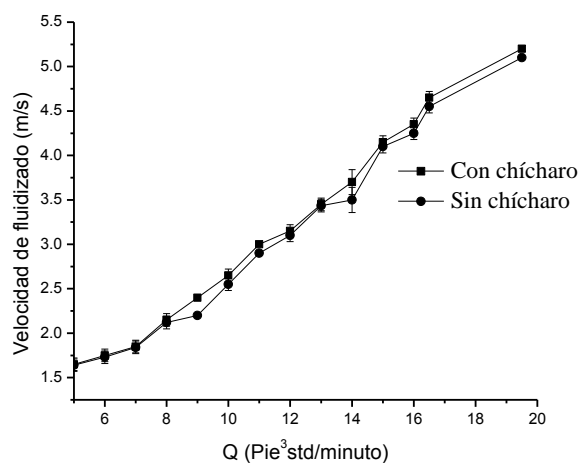
Los parámetros más importantes del modelo hidrodinámico la fracción vacía, altura de lecho, densidad aparente, en condiciones mínimas de fluidización, además de sus correspondientes derivadas. Esta información se alimentó al programa a partir de modelos de 5 parámetros obtenidos en Origin 8.0 a excepción de la fracción vacía en condiciones mínimas de fluidización que se aproximó a una ecuación lineal, ya que un modelo de 5 parámetros no se ajustó. La Tabla C<sub>21</sub> muestra los resultados obtenidos L/D: 0.50 y 50°C.

**Tabla C<sub>21</sub>.** Parámetros hidrodinámicos para L/D: 0.50 y 50°C.

Parámetro	Expresión matemática	R <sup>2</sup>
$h_{mf}$	$0.0197 \exp\left(-\frac{t}{18.0132}\right) + 0.01787 \exp\left(-\frac{t}{102.86006}\right) + 0.01716$	0.997
$\frac{d}{dt}(h_{mf})$	$-0.000363 \exp\left(-\frac{t}{52.04}\right) - 3.63149 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{t}{52.05}\right) + 1.98632 \times 10^{-5}$	0.923
$\rho_p$	$603.004 \exp\left(-\frac{t}{152.97}\right) + 136.93302 \exp\left(-\frac{t}{0.500}\right) + 581.50$	0.997
$\frac{d}{dt}(\rho_p)$	$-6.185 \exp\left(-\frac{t}{41.58}\right) - 0.892 \exp\left(-\frac{t}{0.160}\right) - 1.64689$	0.923
$e_{mf}$	$0.6101 - 5.544 \times 10^{-4} t$	0.890
$\frac{d}{dt}(e_{mf})$	$-5.544 \times 10^{-4}$	-----

## APÉNDICE D. Curva de calibración y caída de presión total para chícharo fresco

D<sub>1</sub>. Velocidad superficial del aire vs flujo volumétrico.



D<sub>2</sub>. Caída de presión en el secador de chícharo

Caída de presión en el secador de chícharo, $\Delta P$			
U, m/s	h, cm de agua		
	L/D = 0.5	L/D = 1.0	L/D = 1.5
1	2.3	2.7	3.1
1.5	6.6	7	7.3
2	10.8	11.2	11.7
2.5	12.2	12.7	13.2
3	20	20.5	21
3.5	27	27.5	27.9
4	43.2	43.7	43.90
4.5	45.5	46	46.3
5	54.3	54.3	54.8

**APÉNDICE E.** Datos experimentales de caída de presión

Tiempo minutos	50°C			60°C			70°C		
	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5
	$\frac{\Delta P_{mf}(t)}{\Delta P_{mf}(t=0)}$			$\frac{\Delta P_{mf}(t)}{\Delta P_{mf}(t=0)}$			$\frac{\Delta P_{mf}(t)}{\Delta P_{mf}(t=0)}$		
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
30	0.579	0.564	0.854	0.594	0.550	0.593	0.424	0.415	0.476
60	0.263	0.359	0.610	0.284	0.350	0.430	0.235	0.303	0.324
90	0.211	0.256	0.405	0.232	0.250	0.326	0.200	0.205	0.244
120	0.179	0.205	0.366	0.219	0.200	0.302	0.188	0.195	0.200
150	0.153	0.154	0.305	0.213	0.150	0.256	0.171	0.190	0.191
180	0.142	0.154	0.268	0.200	0.150	0.209	0.165	0.169	0.191
$\Delta P_{mf}(t=0)$ , cm de agua									
	38	39	41	31	40	43	34	39	45
$\Delta P_{mf}(t=180)$ , cm de agua									
	5.4	6	11	6.2	6	9	5.6	6.6	8.6

**APÉNDICE E.** Datos experimentales de caída de presión

Tiempo minutos	$\frac{\Delta P_{mf}(t)}{\Delta P_{mf}(t=0)}$	$\frac{\Delta P_{mf}(t)}{\Delta P_{mf}(t=0)}$	$\frac{\Delta P_{mf}(t)}{\Delta P_{mf}(t=0)}$
	0	1.000	1.000
30	0.550	0.506	0.514
60	0.350	0.338	0.400
90	0.250	0.297	0.343
120	0.200	0.225	0.309
150	0.150	0.215	0.280
180	0.150	0.199	0.234
$\Delta P_{mf}(t=0)$ , cm de agua			
	40	39.1	35
$\Delta P_{mf}(t=180)$ , cm de agua			
	6	7.8	8.2

APÉNDICE F. Datos experimentales de altura de lecho

Tiempo minutos	50°C			60°C			70°C		
	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5
	$\frac{h_{mf}(t)}{h_{mf}(t=0)}$			$\frac{h_{mf}(t)}{h_{mf}(t=0)}$			$\frac{h_{mf}(t)}{h_{mf}(t=0)}$		
0	1.000	1.000	1.000	1	1	1	1	1	1
30	0.625	0.609	0.754	0.565	0.608	0.666	0.625	0.551	0.628
60	0.500	0.500	0.594	0.478	0.521	0.550	0.583	0.448	0.542
90	0.458	0.435	0.522	0.434	0.456	0.478	0.500	0.408	0.500
120	0.417	0.391	0.493	0.434	0.413	0.449	0.458	0.387	0.471
150	0.375	0.370	0.449	0.391	0.391	0.420	0.458	0.367	0.442
180	0.345	0.310	0.392	0.352	0.318	0.405	0.458	0.306	0.372
$h_{mf}(t=0), m$									
	5.2	11	15.8	5.1	11	15.5	4.8	10.8	15.6
$h_{mf}(t=180), m$									
	1.8	3.4	6.2	1.8	3.5	6.3	2.2	3.3	5.8

F1. Altura mínima de fluidización en el punto central.

Tiempo minutos	$h_{mf}(t)$	$h_{mf}(t)$	$h_{mf}(t)$
	$h_{mf}(t=0)$	$h_{mf}(t=0)$	$h_{mf}(t=0)$
0	1.000	1.000	1.000
30	0.609	0.549	0.569
60	0.522	0.431	0.510
90	0.457	0.412	0.471
120	0.413	0.373	0.451
150	0.391	0.353	0.412
180	0.370	0.353	0.345
$h_{mf}(t=0), m$			
	11	10.2	11
$h_{mf}(t=180), m$			
	3.5	3.6	3.8

**APÉNDICE G.** Datos experimentales de velocidad

Tiempo minutos	50°C			60°C			70°C		
	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5
	$\frac{V_{mf}(t)}{V_{mf}(t=0)}$			$\frac{V_{mf}(t)}{V_{mf}(t=0)}$			$\frac{V_{mf}(t)}{V_{mf}(t=0)}$		
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
30	0.763	0.725	0.786	0.744	0.725	0.762	0.641	0.650	0.643
60	0.684	0.675	0.714	0.564	0.650	0.690	0.538	0.625	0.619
90	0.605	0.600	0.643	0.538	0.600	0.595	0.487	0.500	0.548
120	0.553	0.575	0.619	0.487	0.550	0.595	0.462	0.475	0.524
150	0.500	0.500	0.571	0.487	0.500	0.548	0.462	0.500	0.452
180	0.500	0.500	0.548	0.487	0.500	0.524	0.462	0.500	0.452
$V_{mf}(t=0)$ , m/s									
	3.8	4	4.2	3.9	4	4.2	3.9	4	4.2
$V_{mf}(t=180)$ , m/s									
	1.9	2	2.3	1.9	2	2.2	1.8	2	1.9

**G<sub>1</sub>.** Velocidad mínima de fluidización en el punto central.

Tiempo minutos	$\frac{V_{mf}(t)}{V_{mf}(t=0)}$	$\frac{V_{mf}(t)}{V_{mf}(t=0)}$	$\frac{V_{mf}(t)}{V_{mf}(t=0)}$
	$\frac{V_{mf}(t)}{V_{mf}(t=0)}$	$\frac{V_{mf}(t)}{V_{mf}(t=0)}$	$\frac{V_{mf}(t)}{V_{mf}(t=0)}$
0	1.000	1.000	1.000
30	0.725	0.744	0.718
60	0.650	0.667	0.641
90	0.600	0.590	0.590
120	0.550	0.564	0.538
150	0.500	0.564	0.538
180	0.500	0.538	0.538
$V_{mf}(t=0)$ , m/s			
	4	3.9	3.9
$V_{mf}(t=180)$ , m/s			
	2	2.1	2.1

**APÉNDICE H.** Datos experimentales de humedad.

Tiempo minutos	50°C			60°C			70°C		
	L/D:0. 5	L/D:1. 0	L/D:1. 5	L/D:0. 5	L/D:1. 0	L/D:1. 5	L/D:0. 5	L/D:1. 0	L/D:1. 5
	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
30	0.397	0.4897	0.498	0.336	0.390	0.512	0.259	0.320	0.477
60	0.228	0.2984	0.268	0.180	0.2210	0.252	0.0834	0.176	0.225
90	0.150	0.2069	0.178	0.120	0.143	0.152	0.0550	0.092	0.112
120	0.127	0.1437	0.125	0.084	0.092	0.100	0.0226	0.058	0.070
150	0.087	0.1465	0.103	0.067	0.073	0.072	0.0130	0.038	0.052
180	0.091	0.1034	0.116	0.053	0.058	0.066	0.0130	0.033	0.048
Humedad inicial , X <sub>0</sub>									
	2.872	2.871	3.045	3.02	2.872	2.871	3.035	2.870	2.871
Humedad final , X									
	0.261	0.296	0.335	0.159	0.167	0.191	0.039	0.096	0.137

**H<sub>1</sub>.** Datos de humedad en el punto central.

Tiempo minutos	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>	X/X <sub>0</sub>
0	1	1	1
30	0.359	0.405	0.403
60	0.221	0.221	0.221
90	0.144	0.132	0.133
120	0.093	0.0779	0.078
150	0.073	0.0707	0.070
180	0.055	0.053	0.053
Humedad inicial , X <sub>0</sub>			
	2.871	2.796	2.800
Humedad final , X			
	0.157	0.1481	0.1486

## APENDICE I. Datos experimentales densidad aparente

### I<sub>1</sub>. Datos de densidad aparente a 50°C y diferentes L/D

Tiempo minutos	50°C			60°C			70°C		
	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5
	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>
0	1.322	1.212	1.36	1.159	1.227	1.330	1.159	1.227	1.33
30	1.060	1.142	0.984	1.125	1.002	1.209	1.125	1.002	1.209
60	1.043	1.044	0.872	1.075	1.002	1.073	1.075	1.002	1.073
90	0.880	1.028	0.849	0.913	0.850	1.034	0.913	0.850	1.034
120	0.866	0.965	0.757	0.838	0.845	0.874	0.838	0.845	0.8736
150	0.812	0.924	0.752	0.769	0.797	0.824	0.769	0.797	0.8236
180	0.752	0.820	0.729	0.766	0.747	0.811	0.766	0.747	0.8106

### I<sub>2</sub>. Datos de densidad aparente en el punto central.

Tiempo minutos	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_p$ g/cm <sup>3</sup>
0	1.227	1.416	1.321
30	1.002	1.073	1.038
60	1.002	0.912	0.957
90	0.850	0.857	0.853
120	0.845	0.705	0.775
150	0.797	0.691	0.744
180	0.747	0.666	0.706

**APENDICE J.** Datos experimentales de diámetro de chícharo

Tiempo minutos	50°C			60°C			70°C		
	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5	L/D:0.5	L/D:1.0	L/D:1.5
	d <sub>p</sub> mm	d <sub>p</sub> mm	d <sub>p</sub> mm	d <sub>p</sub> mm	d <sub>p</sub> mm	d <sub>p</sub> mm	d <sub>p</sub> mm	d <sub>p</sub> mm	d <sub>p</sub> mm
0	8.475	8.795	8.53	8.87	8.575	8.055	8.47	8.43	8.838
30	7.64	8.195	7.68	7.62	7.875	7.47	7.74	7.57	8.233
60	7.485	7.755	7.62	7.53	7.255	7.12	7.63	7.55	7.794
90	7.42	7.53	7.42	7.45	7.25	7.05	7.56	7.51	7.576
120	7.33	7.505	7.35	7.43	7.18	6.94	7.52	7.48	7.546
150	7.22	7.47	7.2	7.25	7.175	6.835	7.47	7.435	7.506
180	7.185	7.285	6.98	7.185	7.025	6.825	7.44	7.35	7.330
R'	3.744	3.874	3.752	3.775	3.711	3.571	3.822	3.786	3.894

**J<sub>1</sub>.** Datos de diámetro de chícharo en el punto central.

Tiempo minutos	d <sub>p</sub>	d <sub>p</sub>	d <sub>p</sub>
0	8.575	8.510	8.485
30	7.875	7.605	7.600
60	7.255	7.355	7.120
90	7.250	7.290	7.260
120	7.180	7.275	7.280
150	7.175	7.130	7.345
180	7.025	6.790	6.775
R'	3.711	3.692	3.686



**APENDICE K.** Datos experimentales de encogimiento volumétrico

<b>Tiempo minutos</b>	<b>50°C</b>			<b>60°C</b>			<b>70°C</b>		
	<b>L/D:0.5</b>	<b>L/D:1.0</b>	<b>L/D:1.5</b>	<b>L/D:0.5</b>	<b>L/D:1.0</b>	<b>L/D:1.5</b>	<b>L/D:0.5</b>	<b>L/D:1.0</b>	<b>L/D:1.5</b>
	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
30	0.733	0.809	0.730	0.634	0.775	0.798	0.763	0.724	0.744
60	0.689	0.686	0.713	0.612	0.606	0.691	0.731	0.718	0.725
90	0.671	0.628	0.658	0.593	0.604	0.670	0.711	0.707	0.709
120	0.647	0.621	0.640	0.588	0.587	0.640	0.700	0.699	0.699
150	0.618	0.613	0.601	0.546	0.586	0.611	0.686	0.686	0.686
180	0.609	0.568	0.548	0.532	0.550	0.608	0.678	0.663	0.670

**K<sub>1</sub>.** Datos de encogimiento volumétrico en el punto central.

<b>Tiempo minutos</b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>
0	1.000	1.000	1.000
30	0.775	0.714	0.719
60	0.606	0.646	0.591
90	0.604	0.629	0.626
120	0.587	0.625	0.632
150	0.586	0.588	0.649
180	0.550	0.508	0.509

**APENDICE L.** Datos experimentales de temperatura de lecho a 50°C.

<b>Tiempo minutos</b>	<b>L/D:0.5</b>			<b>L/D:1.0</b>			<b>L/D:1.5</b>		
	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>
0	26.700	28.800	33.800	27.300	39.800	39.300	26.730	29.350	34.075
30	43.000	42.400	37.100	45.600	46.400	44.700	43.130	42.600	37.480
60	46.600	46.900	40.500	47.100	48.100	47.300	46.625	46.960	40.840
90	48.400	48.500	42.100	47.800	49.000	48.000	48.370	48.525	42.395
120	48.800	49.100	42.500	48.800	50.000	48.600	48.800	49.145	42.805
150	49.300	49.900	43.600	49.500	50.700	49.600	49.310	49.940	43.900
180	49.400	50.200	43.400	49.100	50.500	48.800	49.385	50.215	43.670

**L<sub>1</sub>.** Datos experimentales de temperatura de lecho a 60°C.

<b>Tiempo minutos</b>	<b>L/D:0.5</b>			<b>L/D:1.0</b>			<b>L/D:1.5</b>		
	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>
0	47.700	49.900	45.200	31.900	33.700	40.300	50.700	51.600	51.200
30	55.300	51.100	46.900	52.500	52.400	50.000	57.300	57.200	57.800
60	56.900	54.100	48.800	56.400	57.400	54.800	58.300	58.100	58.700
90	57.800	54.900	50.400	57.100	58.300	55.900	59.200	58.500	59.600
120	58.100	54.000	49.800	58.400	59.700	57.400	59.100	58.400	59.600
150	58.300	58.100	53.500	58.400	59.700	57.300	59.800	59.100	59.800
180	59.100	56.900	54.500	59.200	60.400	57.800	59.900	58.800	60.200

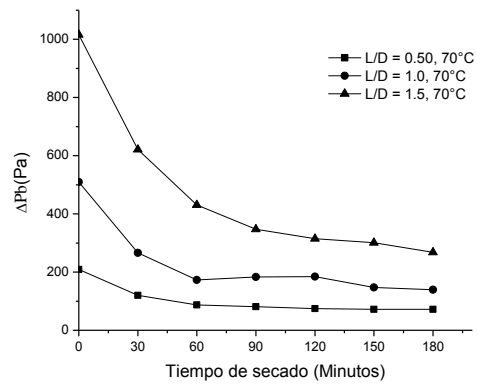
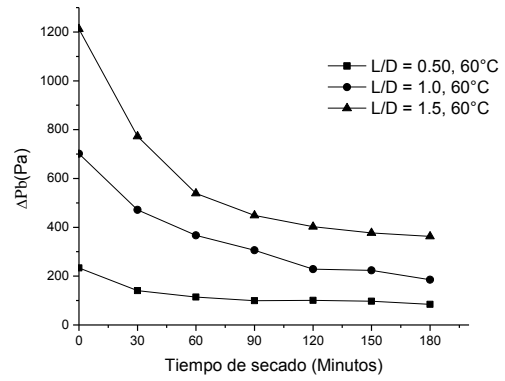
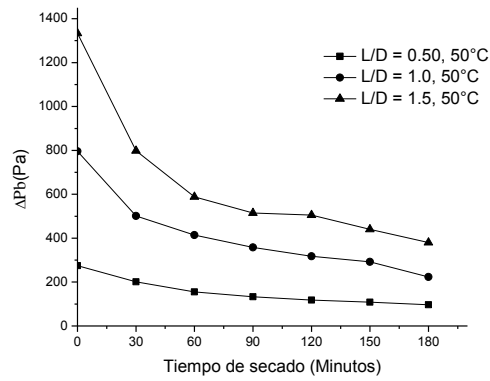
**L<sub>2</sub>.** Datos experimentales de temperatura de lecho a 70°C.

<b>Tiempo minutos</b>	<b>L/D:0.5</b>			<b>L/D:1.0</b>			<b>L/D:1.5</b>		
	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>
0	42.600	31.400	43.200	37.500	33.000	41.300	42.345	31.480	43.105
30	65.700	65.100	61.700	62.000	62.600	55.500	65.515	64.975	61.390
60	67.700	67.700	64.200	66.100	67.700	63.400	67.620	67.700	64.160
90	68.100	68.300	65.100	67.100	69.100	63.800	68.050	68.340	65.035
120	68.900	67.900	66.500	68.100	70.100	64.600	68.860	68.010	66.405
150	69.100	68.100	67.300	68.400	70.700	63.900	69.065	68.230	67.130
180	69.200	68.000	66.800	68.200	70.400	65.100	69.150	68.120	66.715

**L<sub>3</sub>.** Datos de temperatura de lecho en el punto central.

<b>Tiempo minutos</b>	<b>T<sub>11</sub></b>	<b>T<sub>21</sub></b>	<b>T<sub>31</sub></b>	<b>T<sub>12</sub></b>	<b>T<sub>22</sub></b>	<b>T<sub>32</sub></b>	<b>T<sub>13</sub></b>	<b>T<sub>23</sub></b>	<b>T<sub>33</sub></b>
0	31.900	33.700	40.300	39.400	29.500	40.300	32.100	32.700	32.400
30	52.500	52.400	50.000	52.600	53.000	50.400	52.800	52.700	48.900
60	56.400	57.400	54.800	56.800	57.200	54.400	56.200	57.000	52.800
90	57.100	58.300	55.900	57.700	58.900	55.800	57.500	58.400	54.000
120	58.400	59.700	57.400	58.200	59.100	57.100	58.200	59.500	55.400
150	58.400	59.700	57.300	58.900	59.700	58.700	58.300	59.600	56.100
180	59.200	60.400	57.800	58.900	60.500	59.500	59.000	60.100	56.200

## Apéndice M. Resultados teóricos de caída de presión en el lecho.



Apéndice N. Resultados teóricos de caída de presión a L/D constante.

