



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS:

**“PROCESO DE SECADO EN LOTES DE GRANOS
DE TRIGO EN UN SISTEMA DE LECHO
FLUIDIZADO”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

JORGE EMMANUEL TORRES COBIÁN

Director de Tesis:

DR. CÉSAR PÉREZ ALONSO

Asesor Adjunto:

DR. JULIÁN CRUZ OLIVARES

TOLUCA, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2016.



Índice

OFICIO	II
Resumen.....	1
Introducción.....	2
Capítulo 1: Antecedentes	4
1.1 Historia del trigo	5
1.2 Definición de trigo	5
1.3 Almacenamiento de los cereales	8
1.4 Secado	10
1.4.1 Curvas de velocidad de secado	11
1.4.2 Curvas de velocidad de secado a condiciones de secado constante	11
1.4.3 Secado en el periodo a velocidad constante	14
1.4.4 Secado en el periodo de velocidad decreciente	15
1.4.5 Mecanismos de secado	15
1.5 Métodos de transferencia en el secado.....	17
1.5.1 Secado por lotes.....	18
1.5.2 Secado continuo	19
1.5.3 Secado por radiación	19
1.5.4 Secado por conducción	20
1.5.5 Secado por convección.....	20
1.6 Secado en alimentos	20
1.6.1 Deshidratación.....	21
1.6.2 Deshidratación vs secado solar	22
1.6.3 Deshidratación como medio de conservación de alimentos	24
1.7 Secado en lecho fluidizado	25
1.7.1 Regímenes de fluidización	27
1.7.2 Clasificación de partículas	29
1.7.3 Parámetros de fluidización.....	30
1.7.3.7 <i>Altura del lecho a la mínima de fluidización</i>	32
1.7.4 Ventajas del secado en lecho fluidizado	33

1.7.5 Desventajas del secado en lecho fluidizado.....	33
Capítulo 2: Justificación.....	34
Capítulo 3: Objetivos	36
OBJETIVO GENERAL.....	37
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	37
Capítulo 4: Pregunta De Investigación	38
Capítulo 5: Metodología	40
5.1 Material.....	41
5.2 Equipo experimental	41
5.3 Determinación de las propiedades físicas.....	42
5.3.1 Dimensiones características de la partícula	42
5.3.2 Fracción de espacios vacíos.....	44
5.3.3 Esfericidad.....	44
5.3.4 Densidad empacada.....	44
5.3.5 Densidad aparente	45
5.4 Determinación de propiedades hidrodinámicas.....	46
5.4.1 Velocidad mínima de fluidización.....	46
5.4.2 Régimen de fluidización.....	46
5.5 Cinética de secado	47
5.6 Determinación de propiedades de transporte.....	47
5.6.1 Coeficiente de difusividad efectiva.....	47
5.6.2 Energía de activación	50
5.7 Determinación de propiedades termodinámicas	51
5.7.1 Capacidad calorífica	51
5.8 Balance de materia y energía	52
5.8.1 Ecuación del balance de materia en función de la humedad	53
5.8.2 Ecuación del balance de energía.....	54
Capítulo 6: Resultados y discusión	58
6.1 Propiedades físicas.....	59
6.2 Propiedades hidrodinámicas	60

6.3 Cinética de secado	60
6.3.1 Curvas de secado.....	60
6.3.2 Curvas de rapidez de secado	62
6.4 Propiedades de transporte.....	65
6.4.1 Difusividad efectiva.....	65
6.4.2 Energía de activación.....	68
6.5 Determinación de propiedades termodinámicas	70
6.5.1 Capacidad calorífica	70
6.6 Balance de materia y energía	70
6.6.1 Balance de materia.....	70
6.6.2 Balance de energía.....	72
Capítulo 7: Conclusiones	75
Referencias	78
Anexos	81

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo la determinación de la cinética de secado de los granos de trigo en un lecho fluidizado. Con la determinación de las propiedades físicas para los granos de trigo, se obtuvo un tamaño promedio de 0.004 metros, una fracción de espacios vacíos de 0.440 y una esfericidad de 0.949. De acuerdo a la clasificación de Geldart, el grano corresponde al tipo *D*, con una velocidad mínima de fluidización de 1.286 m/s.

Se utilizaron tres tamaños de lote (0.8, 1.0 y 1.2 kg en base seca) a tres diferentes temperaturas (40, 70, y 100 °C) y un flujo de aire de 0.35 m³/s, la temperatura mostró un efecto notable sobre la velocidad de secado, ya que al incrementarse se logra una mayor remoción del contenido de humedad, debido al incremento en la movilidad de las moléculas de agua. De acuerdo a la cinética de secado se aprecia que el mecanismo dominante fue la difusión, por lo tanto fue posible modelar el proceso de secado del trigo mediante la segunda ley de Fick, obteniendo coeficientes de difusión promedio en el intervalo de 1.893E-09 a 3.348E-09 m²/s y valores de energía de activación que van de 3.270 a 7.589 kJ/mol a las condiciones estudiadas. Al incrementar la carga de lecho, la energía de activación disminuyó, indicando que los mecanismos de difusión se ven favorecidos, los cuales están asociados con materiales donde el agua está fuertemente enlazada a la estructura del material y consecuentemente su remoción se encuentra dominada por la estructura de la muestra a secar.

Con el balance de energía se observó que la temperatura de los granos de trigo se incrementó, hasta igualar la temperatura del aire circundante.

Introducción

El crecimiento poblacional a nivel mundial ha incrementado de forma significativa la demanda de alimentos para satisfacer las necesidades de todos los países, en esto se incluye a los cereales; el trigo es uno de los principales debido a su versatilidad que le permite ser usado en muchos procesos de elaboración de alimentos.

Existen diferentes tipos de trigo según la región en que se cultive y por lo tanto distintas calidades, que dependen de factores como la semilla, contenido y calidad de proteína, residuos de pesticidas así como de factores post-cosecha como el almacenamiento, molienda y transformación.

La optimización de las condiciones de almacenamiento, es decisiva para la aplicación que tendrá el trigo, debido a que se determina la cantidad de humedad en los granos y se establecen las necesidades de remoción de humedad apropiadas.

El contenido de humedad permite clasificar los granos desde 2 puntos de vista:

- Comercial: Los cereales pueden ser rechazados o aceptados por la industria según su contenido de humedad.
- Tecnológico: la determinación del contenido de humedad permite clasificar las partidas que se pueden almacenar directamente y las que deben secarse previamente.

Sabiendo esto, se investigaron los distintos métodos para remoción de humedad, siendo elegido el lecho fluorizado por su facilidad para extraer el agua de grandes lotes de granos.

El secado por lecho fluidizado permite remover de forma gradual la humedad de los granos, mediante la introducción del aire caliente que por medio de difusión arrastra el agua del interior del grano hacia la corriente de aire.

Existe la necesidad en la industria de ofrecer productos naturales, mínimamente procesados y libres de químicos, esto va de la mano con la tendencia del

consumidor a preferir este tipo de productos más saludables. A su vez la industria continúa investigando métodos para tener mejores procesos y productos tan naturales como sea posible.

Capítulo 1: Antecedentes

Capítulo 1: Antecedentes

1.1 Historia del trigo

Se cree que el trigo es originario del suroeste de Asia, los restos más antiguos de la cosecha de trigo, se han encontrado en Siria, Jordania y Turquía. Los parientes primitivos del trigo actual se han descubierto en excavaciones de hace 9,000 años. Otras investigaciones muestran que el trigo para pan era cosechado en el valle del Nilo alrededor del año 5000 A.C. así como en India, China e Inglaterra al mismo tiempo (Gibson, 2002). El trigo llega a América en el año 1602 en la costa de Massachusetts.

El trigo se cierra en más tierra de cultivo a nivel mundial que cualquier otro cultivo y es tercer lugar en producción mundial, solo después del arroz y el maíz.

Para explicar ¿qué tan rápido fue domesticado el trigo silvestre?, se expone un modelo gradualista en el antiguo cercano oriente que se cree pudo tomar más de mil años. Este modelo pasa por la recolección ocasional de la naturaleza en temporadas difíciles de cosecha hasta la dificultad de aislar genotipos.

Los orígenes de la agricultura han sido datados entre 10,500 y 9,500 años AP para la región del sudeste de Turquía y el norte de Siria (2), donde los trigos silvestres [Einkorn, *Triticum boeoticum* Boiss y espelta, *T. dicoccoides* (Köm) Aschers y Graebner] siguen creciendo hoy en día (Tanno *et al.*, 2006).

1.2 Definición de trigo

Lo que normalmente conocemos como *grano*, es un tipo de fruto llamado cariósipide. Es un fruto seco de una sola semilla, generado por la familia <<Gramíneas>>. La cariósipide se forma por pericarpio (cubierta) que rodea a la semilla. La semilla a su vez se forma por una epidermis nuclear que envuelve al *embrión* y *endospermo*,

todo esto rodeado en la capa exterior por la cubierta de la semilla. Esto es una descripción general de todo tipo de granos de cereal (Hoseney, 1991).

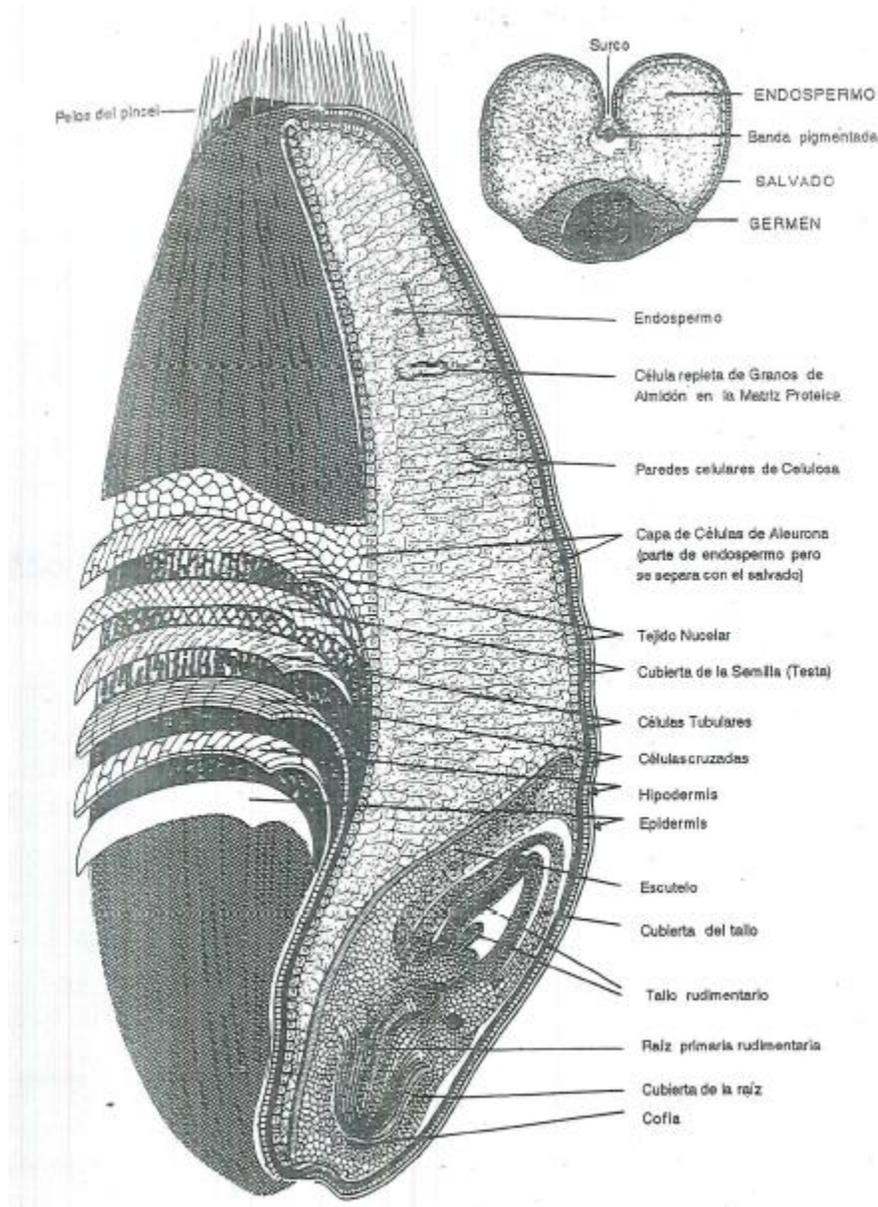


Figura 1.1: Cortes Longitudinal y transversal de un grano de trigo (Hoseney, 1991)

En el caso del trigo, centeno y maíz, el grano se desprende fácilmente de la cáscara mediante la trilla, razón por la que se les llama granos desnudos. A diferencia de cereales como arroz, muchas variedades de cebada y avena que tienen las cubiertas florales tan estrechas que aunque se sometan a la trilla, constituyen la cascara de los granos.

Los granos de trigo son redondos en el dorso (mismo lado del germen) y tienen un surco en la parte ventral, mismo que abarca aproximadamente toda la longitud del grano y penetra casi hasta el centro. Esto es difícil de notar porque los dos carrillos se llegan a juntar, ocultando la profundidad del surco. La longitud promedio de los granos es de 8 mm y peso promedio de 35 mg. Según la variedad del trigo, varía su dureza y color, este último depende del pigmento en la cubierta de la semilla (blanco, rojo o purpura), además de que se puede modificar genéticamente (Hoseney, 1991).

En la figura 1.2 se esquematiza la espiga de trigo y la composición del embrión. En A) Esta la espiga compuesta por numerosas espiguillas, B) Espiguillas mostrando flores con sus cubiertas, C) Partes que componen una flor, D) Grano en proceso de maduración, E) Semilla o grano maduro rodeado por brácteas (Moreno, 1996).

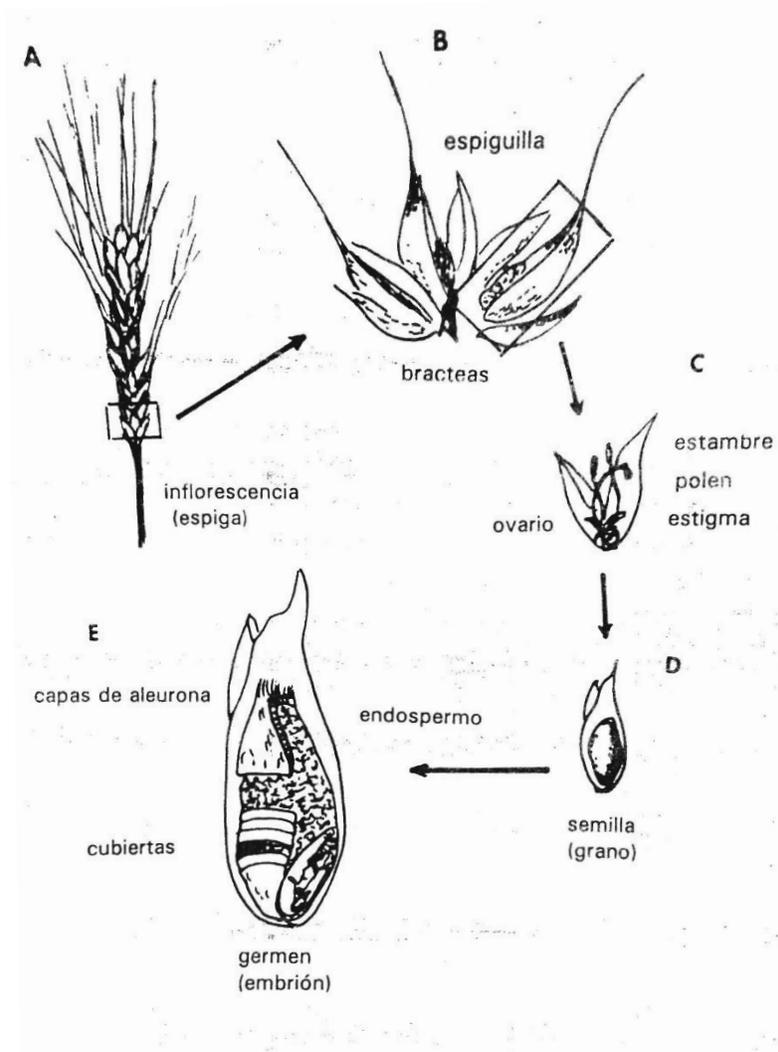


Figura 1.2: Dibujo de la flor y el fruto (semilla) del trigo (Moreno, 1996).

1.3 Almacenamiento de los cereales

Por lo general, los cereales son sometidos a almacenamiento durante periodos de tiempo relativamente largos. Cuando se almacenan protegidos de las inclemencias meteorológicas y evitando insectos y roedores, se pueden conservar fácilmente durante varios años. Bajo condiciones ideales de almacenamiento (baja temperatura, atmósfera inerte, etc.) el periodo de seguridad para la conservación, se puede medir en decenios.

En comparación con alimentos como productos lácteos, carnes y hortalizas frescas, los cereales son relativamente fáciles de almacenar. Sin embargo, pueden estropearse, si las condiciones de almacenamiento no son apropiadas.

Dependiendo de la zona, la cosecha se realiza una y hasta 2 veces al año, por lo tanto la mayor parte se mantiene almacenada conforme se va utilizando. El almacenamiento se realiza desde la forma sencilla de vertido sobre el suelo, hasta el almacenamiento sobre grandes estructuras de cemento, diseñadas para vaciarlas en cuestión de minutos.

Las sociedades primitivas solían almacenar bajo tierra el excedente de su grano. Esta práctica continúa hoy día en algunas regiones del globo. El almacenamiento subterráneo ofrece varias ventajas. Por ejemplo: Protege al grano, de las variaciones diarias y estacionales de temperatura; la construcción es relativamente sencilla; y protege al cereal de insectos y hongos a causa del bajo contenido de oxígeno y alto valor de CO₂ en el aire que queda entre las semillas. Por supuesto, el lugar para hacer el subterráneo debe ser elegido para que tenga ambiente seco.

El almacenamiento a granel en depósitos es el sistema más generalizado hoy día. El tamaño del depósito puede variar desde unos pocos centenares de bushels¹ para el almacenamiento de una granja, hasta decenas de miles de bushels para el silo del terminal de un elevador.

Cuando se vierte el grano a un depósito, forma un ángulo con la horizontal que se llama *ángulo al reposo*. El ángulo que forman la mayoría de los granos es de unos 27°. El grano húmedo o el grano muy pequeño produce pendientes ligeramente más planas. La tolva de descarga en la parte inferior del silo, debe tener forma cónica con pendiente mayor que la del ángulo de reposo, pues si no, no fluirá el grano. Los depósitos más pequeños necesitan pendientes mayores a causa de la mayor fricción sobre los lados de la tolva.

¹ Medida que en EE.UU. equivale a 35 L

La humedad tiene también la mayor importancia para el almacenamiento seguro del grano. Los microorganismos, particularmente ciertas especies de hongos, son causa importante del deterioro del grano. Tres factores fundamentales controlan la velocidad de crecimiento de hongos en los cereales. Estos son: humedad, tiempo y temperatura.

De los tres, la humedad es el más importante. Con bajos contenidos de humedad, no prosperarán los hongos, pero con un 14% o poco más, empieza el desarrollo fúngico. Entre 14 y 20% un pequeño aumento del nivel de humedad, hace variar grandemente la velocidad de crecimiento fúngico, y también hace variar las especies que se desarrollarán. Por esto, si se van a almacenar cereales durante algún tiempo, es importante conocer la cantidad de humedad de cualquier porción del grano almacenado.

La medición del contenido de humedad es, por lo menos, difícil. Esto se debe a que la cantidad de cada grano puede variar, según: el origen del grano, diferencias del suelo, madurez del grano, por mencionar algunas. El nivel de humedad importante, no es el promedio, si no, la humedad más elevada que tiene el lote (Hoseney, 1991).

1.4 Secado

El término secado se refiere a la eliminación de agua en un material de proceso u otra sustancia, también se usa para referirse a la eliminación de otros líquidos orgánicos de los materiales sólidos. Hay que remarcar que no es lo mismo secado y evaporación, debido a que esta última se refiere a grandes cantidades de agua y esto se hace en el punto de ebullición, mientras que el secado es la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas (Geankoplis, 2006; Treybal, 1988).

Por otro lado, el agua también se puede eliminar de los sólidos, por medios mecánicos (centrifugas, prensas, etc.), a diferencia de los medios térmicos, es más económico pero el contenido final de humedad varía según el método.

El secado de alimentos u otros materiales biológicos, se usa como método de preservación, esto se explica porque los microorganismos que causan la

descomposición de los alimentos no pueden crecer ni multiplicarse en ausencia de agua. Para los alimentos, normalmente se deja por debajo del 5 % para conservar su sabor y nutrientes, además de que por debajo del 10 %, los microorganismos dejan de ser activos (Geankoplis, 2006).

1.4.1 Curvas de velocidad de secado

1.4.1.1 Introducción

Cuando se diseña un proceso para el secado de un material determinado, generalmente se estima el tamaño del secador, se establecen las condiciones de operación (humedad y temperatura del aire empleado) y se especifica el tiempo para lograr el grado de secado. No es posible predecir el contenido de humedad de equilibrio de diversos materiales, por lo que es necesario determinarlo por vías experimentales. (Geankoplis, 2006; Foust et al., 1987).

1.4.1.2 Determinación experimental de la velocidad de secado

Para determinar experimentalmente la velocidad de secado de un material, se coloca una muestra en una bandeja. La pérdida en peso de humedad durante el secado puede determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación, colgando la bandeja de una balanza adaptada a un gabinete o a un ducto a través del cual fluye el aire de secado. Entre las precauciones que se deben tomar, están que la velocidad, la humedad, la temperatura y la dirección del aire deben mantener una relación proporcional para simular un secado en condiciones constantes y esto se debe asemejar lo más posible a las condiciones a utilizar a gran escala (Geankoplis, 2006).

1.4.2 Curvas de velocidad de secado a condiciones de secado constante

1.4.2.1 Conversión de datos experimentales a curva de velocidad de secado

Los datos obtenidos de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresan como peso total W del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos de t horas durante el periodo de secado. Estos valores se pueden convertir a datos de velocidad de secado por el siguiente procedimiento. Primero se recalculan los datos. Si W es el peso del sólido húmedo en kilogramos

y W_s es el peso del sólido seco en kilogramos, entonces el contenido de humedad libre (X) se determina mediante la siguiente fórmula(1.4.1):

$$X(t) = \frac{W - W_s}{W_s} \left[\frac{\text{kg totales de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right] \quad (1.4.1)$$

Después de haber establecido las condiciones de secado constante, se determina el contenido de humedad en el equilibrio X_e (kg de humedad en el equilibrio/kg de sólido seco), con este dato, se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre X (kg de agua libre/kg de sólido seco) para cada valor de humedad en un tiempo determinado X_t (kg de agua libre/kg de sólido seco) (Geankoplis, 2006).

$$X = X_t - X_e \quad (1.4.2)$$

Al sustituir los datos calculados en la ecuación anterior se traza una gráfica del contenido de humedad libre X en función del tiempo t en horas, como se muestra en la Figura 1.4.1. Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica, se miden las pendientes de las tangentes a la curva, lo que proporciona valores de dX/dt para ciertos valores de tiempo. Se calcula entonces la velocidad R para cada punto con la expresión:

$$R = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (1.4.3)$$

Donde R es la velocidad de secado en $\text{kg H}_2\text{O/h} \cdot \text{m}^2$, L_s son los kg de sólido seco y A es el área superficial expuesta al secado en m^2 (Geankoplis, 2006).

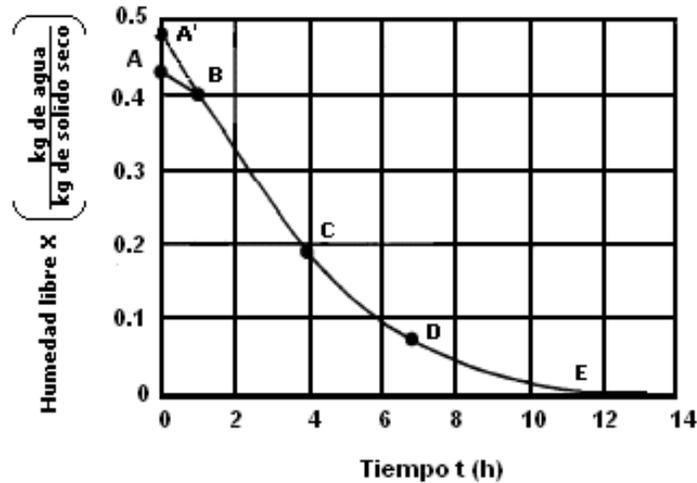


Figura 1.4.1 Curva típica de velocidad de secado constante, gráfica de los datos de humedad libre en función del tiempo (Geankoplis, 2006).

1.4.2.2 Gráfica de la curva de la velocidad de secado

En la Figura 1.4.2 se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando en el tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final y la velocidad de evaporación va en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al empezar la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. Este periodo inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado (Geankoplis, 2006).

La curva de la Figura 1.4.1 es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. Este *periodo de velocidad constante de secado* corresponde a la línea BC en la Figura 1.4.2.

En el punto C tanto en la Figura 1.4.1 y la Figura 1.4.2, la velocidad de secado comienza a disminuir en el *periodo de velocidad decreciente*, hasta llegar al punto

D. En este primer periodo de velocidad decreciente, la velocidad corresponde a la línea *CD* en la Figura 1.4.2, y por lo general es lineal.

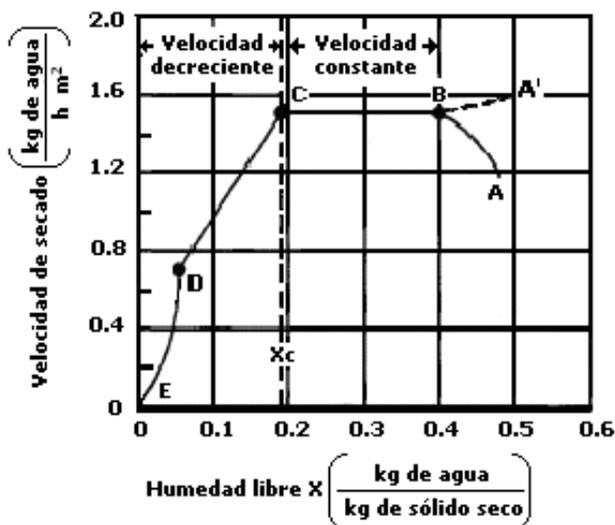


FIGURA 1.4.2 CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD LIBRE (GEANKOPLIS, 2006; TREYBAL 1988).

En el punto *D* la velocidad de secado disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto *E*, donde el contenido de humedad de equilibrio es X_e , $X = X_f - X_e = 0$. En el secado de algunos materiales, la región *CD* no existe, o bien constituye la totalidad del periodo de velocidad decreciente (Geankoplis, 2006).

1.4.3 Secado en el periodo a velocidad constante

Durante el periodo de velocidad constante, la superficie del sólido está mojada inicialmente y sobre ella hay una película de agua continua. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Sin embargo, las ondulaciones y hendiduras en la superficie del sólido ayudan a obtener una velocidad más alta de la que tendría una superficie completamente plana.

Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el periodo de velocidad constante proviene de su interior. Este periodo continúa mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora. La

evaporación durante este periodo es similar a la que existe cuando se determina la temperatura de bulbo húmedo, y en ausencia de transferencia de calor por radiación o conducción la temperatura de la superficie equivale en forma aproximada a la temperatura de bulbo húmedo (Geankoplis, 2006).

1.4.4 Secado en el periodo de velocidad decreciente

El punto *C* de la Figura 1.4.2 corresponde al contenido crítico de humedad libre X_C . En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad en el punto *D* de la Figura 1.4.2.

El segundo periodo de velocidad decreciente empieza en el punto *D*, cuando la superficie esta seca en su totalidad. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El calor de evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire.

Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el periodo de velocidad decreciente sea bastante pequeña; no obstante, el tiempo requerido puede ser largo. En la Figura 1.4.1 se ilustra este efecto. El periodo *BC* para un secado de velocidad constante dura unas 3.0 h y hace que X disminuya de 0.40 a 0.19, esto es, una reducción de 0.21 kg H₂O/kg sólido seco. El periodo de velocidad decreciente *CE* continúa durante unas 9.0 h y X disminuye solamente de 0.19 a 0 (Geankoplis, 2006; Treybal, 1988).

1.4.5 Mecanismos de secado

Cuando el secado se verifica por evaporación de la humedad del área expuesta del sólido, la humedad se desplaza desde el interior del sólido hasta la superficie. Los mecanismos de este movimiento afectan al secado durante los periodos de velocidad constante y de velocidad decreciente. A continuación se analizan brevemente algunas teorías para explicar los diversos tipos de curvas de velocidad decreciente.

1.4.5.1 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 con sólidos no porosos, en los que se forman soluciones de una sola fase con la humedad, como en una pasta, un jabón, una gelatina y pegamento.

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.

Se dice que los materiales que se secan lentamente se realizan por medio del mecanismo de difusión. Este mecanismo se da cuando el aire que se utiliza para secar ha absorbido toda la humedad del exterior del sólido llegando este a tener la misma humedad del aire de secado y la humedad que se encuentra ligada al sólido va desapareciendo lentamente por difusión (Geankoplis, 2006).

Se han reportado modelos para determinar la difusividad a partir de curvas de secado y se encontró que depende de la temperatura y la cantidad de humedad en el material (Kechaou y Maâlej, 2000).

En los casos de que la difusividad es fuertemente dependiente del contenido de humedad se ha reportado por algunos autores que proponen métodos numéricos para obtener mejores resultados al resolver las ecuaciones dependientes del fenómeno de transferencia. Aunque se debe tener en cuenta que estos métodos numéricos deben considerar la transferencia de calor y masa al igual que los cambios de volumen (Zogzas et al., 1994).

1.4.5.2 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 libre o sin combinar se desplaza a través de capilares y espacios vacíos de los sólidos por acción capilar, y no por difusión.

Un sólido poroso contiene poros 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 (Geankoplis, 2006).

1.4.5.3 Efecto de la contracción

Un factor que afecta con frecuencia a la velocidad de secado es la contracción del sólido al eliminarse la 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 resulta impermeable al flujo de líquido o de vapor y disminuye la velocidad de secado; algunos ejemplos son la arcilla y el jabón.

En muchos alimentos, si el secado se realiza a temperaturas muy altas, se forma en la superficie 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. Otro efecto de la contracción ocasiona que el material se deforme y cambie su estructura, esto sucede, por ejemplo, en el secado de madera.

Algunas veces, para disminuir estos efectos del secado, es aconsejable emplear aire húmedo. Así se disminuye la velocidad de secado y los efectos de la contracción, que ocasionan deformación o endurecimiento de la superficie, se reducen notablemente (Geankoplis, 2006).

1.5 Métodos de transferencia en el secado

Según el tipo de material que se esté secando y el contenido de humedad que se quiera lograr, existen equipos con 2 métodos de operación: Por lotes y continuos. Estos se pueden aplicar específicamente según la sustancia a secar. En la figura 1.5.1 podemos ver algunas clasificaciones de estas operaciones.

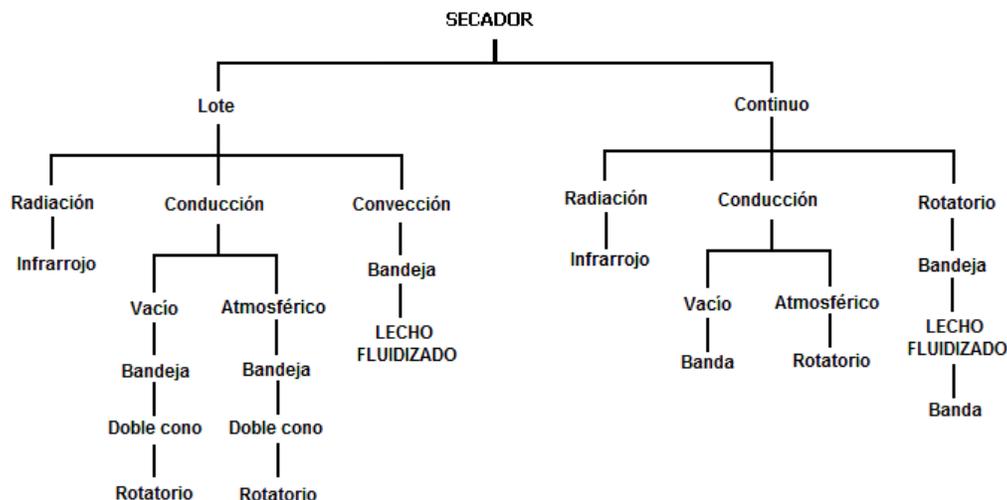


Figura 1.5.1 Clasificación de secadores (Gardner, 1973).

1.5.1 Secado por lotes

El equipo por lotes, o semilotes, se opera intermitente o cíclicamente en condiciones de estado no estacionario: el secador se carga con la sustancia, que permanece en el equipo hasta que se seca; entonces, el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote.

El secado por lotes es una operación relativamente cara; en consecuencia se limita a operaciones a pequeña escala, a plantas piloto y a trabajos de investigación, y para secar materiales valiosos cuyo costo total será poco alterado por el costo agregado en la operación de secado.

Con el fin de fijar horarios de secado y determinar el tamaño del equipo, es necesario saber el tiempo que se requerirá para secar una sustancia a partir de un contenido de humedad a otro en condiciones específicas. También se desea calcular el efecto que tendrán las diferentes condiciones de secado en el tiempo del secado. El conocimiento del mecanismo de secado es tan incompleto que, salvo pocas excepciones, es necesario con este fin confiar al menos en algunas mediciones experimentales. Las mediciones de la rapidez del secado por lotes son relativamente fáciles y proporcionan mucha información no sólo para la operación por lotes sino también para la continua (Treybal, 1988).

1.5.2 Secado continuo

Los secadores continuos generalmente se operan en estado estacionario.

El secado continuo ofrece las ventajas siguientes: generalmente el equipo necesario es pequeño en comparación con la cantidad de producto; la operación se integra fácilmente con la fabricación química continua, sin necesidad del almacenamiento intermedio; el producto tiene un contenido más uniforme de humedad, y el costo de secado por unidad de producto es relativamente pequeño.

Como en el caso del secado por lotes, la naturaleza del equipo que se utiliza depende bastante del tipo de material que se va a secar. Pueden utilizarse el secado directo o indirecto y algunas veces los dos.

El sólido se mueve a través del secador mientras que está en contacto con una corriente móvil de gas. El gas y el sólido pueden fluir en paralelo o a contracorriente; asimismo, el gas puede fluir tangencialmente a la trayectoria del sólido (Treybal, 1988).

En la figura 1.5.2 se puede observar un ejemplo de secador continuo rotatorio de circulación transversal.

1.5.3 Secado por radiación

El secado por radiación, independientemente del volumen, consiste en calentar mediante radiaciones y de forma direccionada, las zonas donde se interesa calentar. Generalmente, el secado por radiación se usa en locales abiertos donde no es posible (o excesivamente costoso) elevar la temperatura del aire, o en casos donde la humedad es tal que es necesaria la exposición infrarroja para la adecuada y pronta eliminación de humedad.

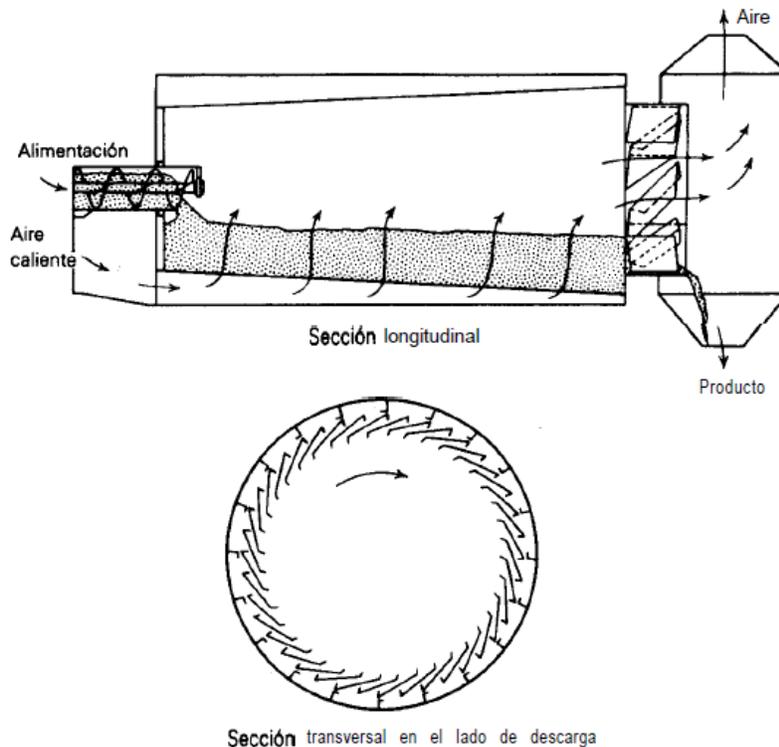


FIGURA 1.5.2, SECADOR ROTATORIO DE CIRCULACIÓN TRANSVERSAL CONTINUO
(TREYBAL, 1988)

1.5.4 Secado por conducción

El producto que debe secarse se encuentra en recipientes calentados o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido.

1.5.5 Secado por convección

El calor necesario para la evaporación del líquido se transmite por un agente gaseoso o un vapor que pasa por encima del sólido o lo atraviesa (Kudra y Mujumdar, 2002; Treybal, 1988).

1.6 Secado en alimentos

Se desconoce cuándo se inició la conservación de alimentos por deshidratación, pero la Historia muestra que nuestros antepasados aprendieron como secar alimentos por ensayo y error (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000).

La deshidratación de alimentos es uno de los métodos más usados para la preservación de los alimentos, ya que las frutas y verduras deshidratadas son fáciles de manejar y de incorporar en la preparación de alimentos, además que una de las ventajas más importante que poseen los alimentos deshidratados, es que no pierden sus propiedades a condiciones ambiente (Giraldo-Zúñiga et al., 2006; Senadeera et al., 2005).

En general, el agua es el principal componente en los alimentos y esto influye directamente en la calidad de los mismos, la deshidratación de productos agrícolas es la técnica más usada para comercializar frutos y verduras (Simal et al., 2006; Bala et al., 2003).

Al reducir el contenido de agua en un alimento hasta un nivel muy bajo se elimina la posibilidad de su deterioro biológico y se reducen apreciablemente las velocidades de otros mecanismos de deterioro.

Además del efecto conservante, mediante la deshidratación se reducen el peso y el volumen del alimento, aumentando la eficiencia de los procesos de transporte y almacenaje. Además, la deshidratación de un alimento produce que este alimento sea más apto para el consumo humano (Senadeera et al., 2005; Simal et al., 2006).

La conservación de frutas y hortalizas mediante su deshidratación supone un importante desafío, debido a la estructura de estos productos la eliminación de agua debe hacerse de modo que el perjuicio sobre su calidad sea mínimo. Para obtener estos resultados con frutas y verduras deshidratadas los procesos de transferencia de materia y de calor deben ser optimizados, por lo que para el diseño del proceso es necesario un cuidadoso análisis del efecto de estos fenómenos de transporte en la estructura del alimento. Solo mediante un buen conocimiento y análisis de estos procesos podrá obtenerse un alimento de óptima calidad (Yamamoto y Sano, 1994; Singh y Heldman, 1998).

1.6.1 Deshidratación

Cuando el proceso de secado se realiza artificialmente se le llama deshidratación. La deshidratación es un proceso en el cual el agua se elimina para detener o

aminorar el crecimiento de microorganismos perjudiciales, así como de ciertas reacciones químicas.

La deshidratación es una operación en la cual tiene lugar la transferencia de calor y la transferencia de masa, a diferencia del secado natural en donde solo se realiza la evaporación (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000; Norman, 1990).

Un producto deshidratado es aquel que no contiene más del 2.5% de agua (base seca), mientras que el alimento seco es todo aquel producto alimenticio que ha sido expuesto a un proceso de eliminación de agua y que contiene más del 2.5% de agua (base seca) (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000).

1.6.2 Deshidratación vs secado solar

El secado de los alimentos es uno de los métodos más antiguos que ha utilizado el hombre para conservarlos. El hombre primitivo utilizó la energía solar que calentaba el medio ambiente, para secar sus alimentos al aire libre. Actualmente el secado de frutas y hortalizas es un proceso industrial muy importante en la preservación de la calidad de los productos agrícolas ya que permite prolongar la vida de anaquel sin necesidad de invertir en sistemas de refrigeración y conservación (De Montellano, 2004; Ortiz, 2003).

La deshidratación implica el control sobre las condiciones climáticas dentro de un equipo. El secado solar es una alternativa barata en regiones tropicales secas. No así en regiones tropicales húmedas, debido al cambio o aumento repentino de la humedad relativa en el medio ambiente por las lluvias (Norman, 1990).

El secado por aire calentado orientado a túneles o cabinas en donde se coloca el producto, es el más eficiente y recomendado, al proporcionar un producto de mejor calidad, consumir menos tiempo y minimizar las pérdidas. Los equipos construidos pueden controlar el proceso de secado: temperatura y velocidad del aire, y la disposición de alimento a secar (Jayaraman y Das Gupta, 1992).

Se necesita más terreno para la actividad secadora natural que para una deshidratación artificial. Las condiciones sanitarias son controlables dentro de una planta de deshidratación mientras que en el campo abierto la contaminación de

polvo, los insectos, los pájaros y los roedores son problemas importantes (Norman, 1990).

La deshidratación es un proceso más caro que el secado solar, pero los alimentos deshidratados tienen mejor calidad que sus homónimos secados al sol y por ende mayor valor económico; por ejemplo, con el secado solar las frutas pierden el azúcar debido a la continua respiración de los tejidos y también a la fermentación. En el cocinado los alimentos deshidratados pueden dar mejor calidad a la comida que los secados al sol (Norman, 1990; Giraldo-Zúñiga et al., 2006).

El sabor y aroma de algunas especies se intensifica durante el proceso de desecación, porque no solo eliminan los compuestos responsables del olor graso, sino también gran parte de la humedad, lo que origina un sabor fuerte debido al aumento de la concentración de los compuestos no volátiles. Sin embargo, el color de la fruta secada al sol puede dar un mejor aspecto que la deshidrata bajo condiciones óptimas de operación de ambos métodos. La madurez de una fruta desde el punto de vista del color continúa lentamente durante el secado solar a diferencia de la deshidratación en donde esto no sucede (Norman, 1990).

En el secado solar, en la mayor parte de los casos, las plantas de las especies recolectadas se extienden sobre el terreno de cultivo para que se desequen durante varios días, hasta que se alcanza el nivel de humedad deseado, por lo que gran número de organismos, que se encuentran en el suelo especialmente las bacterias formadoras de esporos (por ejemplo *Bacillus* spp) que se halla hasta niveles de 10^6 – 10^8 células/g, le pueden causar aparte de la contaminación directa, recuentos anormalmente altos de microorganismos.

Sin embargo, raramente las especies están infectadas por bacterias patógenas como *Escherichia coli* o *Salmonella*. Algunos tipos de mohos son capaces de producir sustancias tóxicas, por ejemplo, *Aspergillus flavus* y *Aspergillus ochraceus*, que producen peligrosas toxinas llamadas aflatoxina y ochratoxina. Es conocido que la aflatoxina es cancerígena. Los principales mohos contaminantes de especias son *Aspergillus glaucus* y *Aspergillus Níger* (Hirasa y Takemasa, 2002).

Sobre la base de costo, indudablemente el secado solar tiene ventajas, aunque sobre la base de tiempo de secado y calidad, la deshidratación es altamente competitiva. Los requerimientos de almacenamiento de los alimentos secos y deshidratados son mínimos y los costos de distribución son reducidos (Norman, 1990).

1.6.3 Deshidratación como medio de conservación de alimentos

Algunas propiedades de los alimentos frescos se ven afectadas por diversas razones, estas pueden ser por reacciones químicas o biológicas. Una de las principales reacciones químicas es la oxidación. El aceite o grasa que contienen los alimentos reacciona con el oxígeno del aire formando peróxidos que son posteriormente oxidados y descompuestos a alcoholes y aldehídos de bajo peso molecular, produciendo rancidez y ocasionando la pérdida del producto y la posibilidad mercantil (Norman, 1990).

Al reducir el contenido de agua de un alimento hasta un nivel muy bajo se elimina la posibilidad de su deterioro biológico, y se reducen apreciablemente las velocidades de otros mecanismos de deterioro, no obstante para evitar cualquier duda, a un alimento deshidratado se le pueden agregar ciertos aditivos químicos o simplemente empacándolos adecuadamente se conservan por más tiempo (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000).

Del mismo modo es casi imposible que un alimento se encuentre exento de ataques biológicos. Los microorganismos están ampliamente distribuidos en toda la naturaleza y los productos alimenticios en un tiempo o en otro están en contacto con el suelo y el polvo, se anticipa que los microorganismos estarán activos siempre que las condiciones lo permitan, por tanto un método obvio de control es la restricción de la humedad por el crecimiento. La cantidad de humedad en el alimento establece que microorganismos tendrán oportunidad de crecer (Norman, 1990).

Además del efecto conservante, el secado, que convierte el alimento crudo en un sólido seco, se utiliza para reducir el costo o dificultad en embalaje, manejo, almacenamiento y transporte, pues el secado reduce el peso y a veces el volumen (Singh y Heldman, 1998).

1.7 Secado en lecho fluidizado

La fluidización es una de las técnicas más usadas para el secado de partículas sólidas. Los sólidos granulares, fluidizados mediante algún medio de secado como aire caliente se pueden secar y enfriar en lechos fluidizados similares (Kudra y Mujumdar, 2002).

Las características principales de los lechos fluidizados incluyen el flujo tangencial del sólido y el gas de secado, un tiempo de residencia controlable de los sólidos de segundos a horas y la posibilidad de cualquier temperatura del gas. En este tipo de secado los sólidos fluyen libremente y para lograrlo adecuadamente es preferible que tengan un tamaño de 0.1 a 36 mm. Puesto que el flujo de masa del gas para los requerimientos térmicos es básicamente menor que la requerida para la fluidización, el lecho se opera en forma más económica a la velocidad mínima para la fluidización (Gardner, 1973).

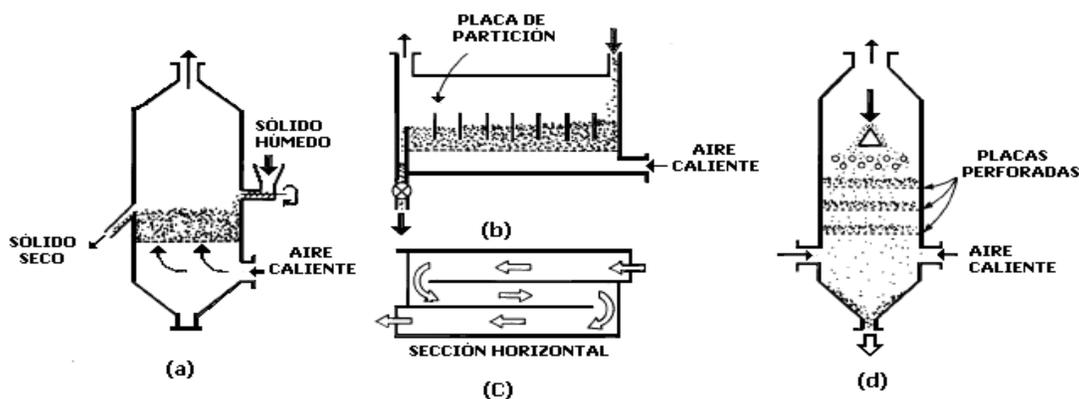
Generalmente, un lecho se fluidiza mediante un flujo de aire caliente lo que resulta en unas condiciones que son ideales para su aplicación. Existe un contacto íntimo entre el gas y el sólido a una velocidad que provoca coeficientes de transferencia de calor muy altos, con la combinación de la conducción y la convección. Si a esto le aunamos una humedad relativa, obtenemos evaporación casi instantánea a lo que le sigue una importante caída en la temperatura del gas. Así, se mezclan los sólidos eficientemente de lo cual se obtiene un alto grado de uniformidad del secado (Singh y Heldman, 1998; Pell, 1990; Kudra y Mujumdar, 2002).

En un sistema de lecho fluidizado las partículas se mantienen en suspensión mediante el aire caliente (regularmente de abajo hacia arriba), utilizado para su secado, el movimiento del producto a secar se favorece por la disminución de la masa de las partículas conforme se van secando. El propio movimiento de las partículas fluidizando provoca que todas ellas se sequen en igual medida (Singh y Heldman, 1998; Geankoplis, 2006).

El lecho fluidizado se usa en una amplia gama de industrias debido a su posible gran capacidad, su costo bajo de construcción, fácil operación y alta eficiencia

térmica. La única limitación es que el sólido pueda ser fluidizado por un gas. La Figura 1.4 muestra varios diseños de secadores de lecho fluidizado. Esta técnica ha sido usada desde 1948 (Kunii y Levenspiel, 1991; Reay, 1986).

- (a) Utilizado para materiales inorgánicos.
- (b) y (c) Utilizado cuando el tiempo de fluidizado por partícula es importante.
- (d) Para obtener un contraflujo.
- (e) Para sustancias (por ejemplo, fármacos) que requieren tiempos idénticos de secado.
- (f) Para materiales sensibles a temperaturas elevadas, la temperatura del aire es baja. Para evitar la reducción en la eficiencia térmica se recupera el calor de los sólidos secos.
- (g) Para materiales muy húmedos, operando a presiones elevadas y con vapor sobrecalentado se pueden obtener eficiencias térmicas mucho mayores que con secadores convencionales. Entre mayor sea el contenido de agua, más eficiente el sistema.



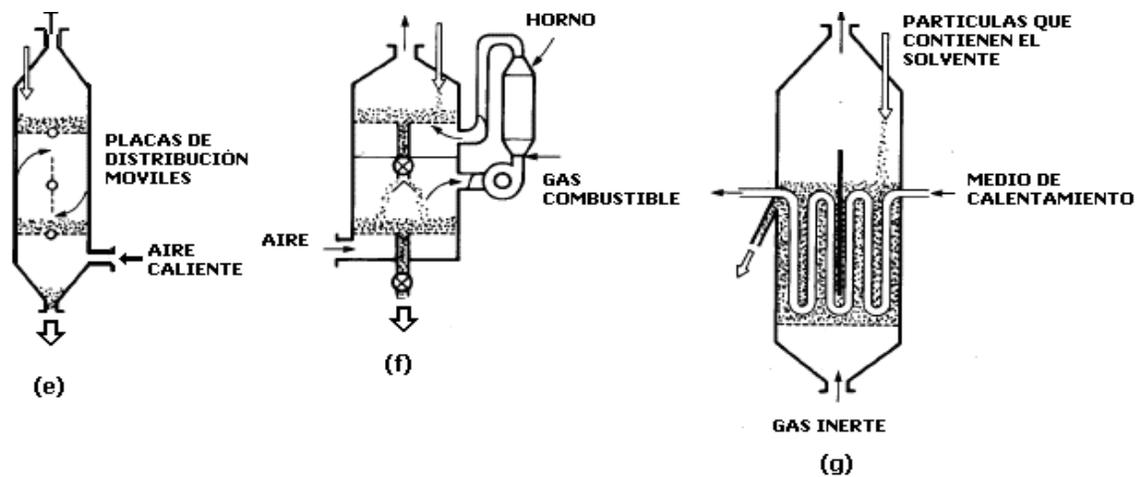


Figura 1.7 Tipos de secado de lecho fluidizado (Kunii y Levenspiel, 1991).

Este método ha sido adoptado con ventajas en el secado de sólidos granulares como granos, fertilizantes, químicos y minerales. Las condiciones de fluidización así como las propiedades de los granos tienen un alto impacto en la velocidad de secado: los materiales sin porosidad secan a tasa constante; los porosos con tasa constante y luego decreciente (Srinivasa Kannan *et al.*, 1995).

No todos los materiales húmedos son fáciles de fluidizar. Debido al alto contenido de agua, unos tienden a aglomerarse y/o pegarse a superficies metálicas (Singh y Heldman, 1998; Kudra y Mujumdar, 2002).

1.7.1 Regímenes de fluidización

En un sistema de lecho fluidizado sólido-gas se presentan cinco regímenes de fluidización, como se puede ver en la Figura 1.7.1, es de esperar que el lecho se comporte distinto cuando se hacen variar algunos parámetros como la velocidad de fluidización, las propiedades del fluido, propiedades de las partículas, el diámetro del lecho, etc. (Kunii y Levenspiel, 1991).

El primer régimen que se identifica se conoce como *lecho fijo*, y se da cuando las partículas del lecho se encuentran estáticas, normalmente sucede esto antes de

que el fluido alcance la velocidad mínima para que las partículas empiecen a fluidizar.

Cuando se alcanza esta velocidad mínima de fluidización aparece un régimen llamado de *fluidización mínima*.

Si la velocidad continua incrementándose, se llega a una velocidad denominada velocidad mínima de burbujeo o borboteo, y comienzan a aparecer burbujas en el lecho dando como resultado una *fluidización de burbujeo o borboteo*.

Con un aumento aun mayor de la velocidad del fluido, las burbujas continúan creciendo y ocupando cada vez más espacio en el lecho, provocando que las partículas sean empujadas hacia abajo por las paredes; incluso puede darse el caso en que la burbuja crezca tanto que alcance las paredes y pierda su forma para convertirse en un espacio ocupado solamente por el fluido, dividiendo así completamente el lecho hasta que esta “burbuja” que ocupa todo el lecho se elimine. Este régimen llamado *fluidización de segregación*, generalmente es indeseable debido a las fluctuaciones de presión en el lecho, el aumento del arrastre y las dificultades que se presentan para cambio de escala en unidades mayores.

A velocidades muy altas, se llega a un estado donde las partículas son acarreadas hacia fuera del lecho, incluso si la altura de la columna es grande, entonces se puede alcanzar el estado de *fluidización con transporte neumático* (Pell, 1990; Kunii y Levenspiel, 1991).

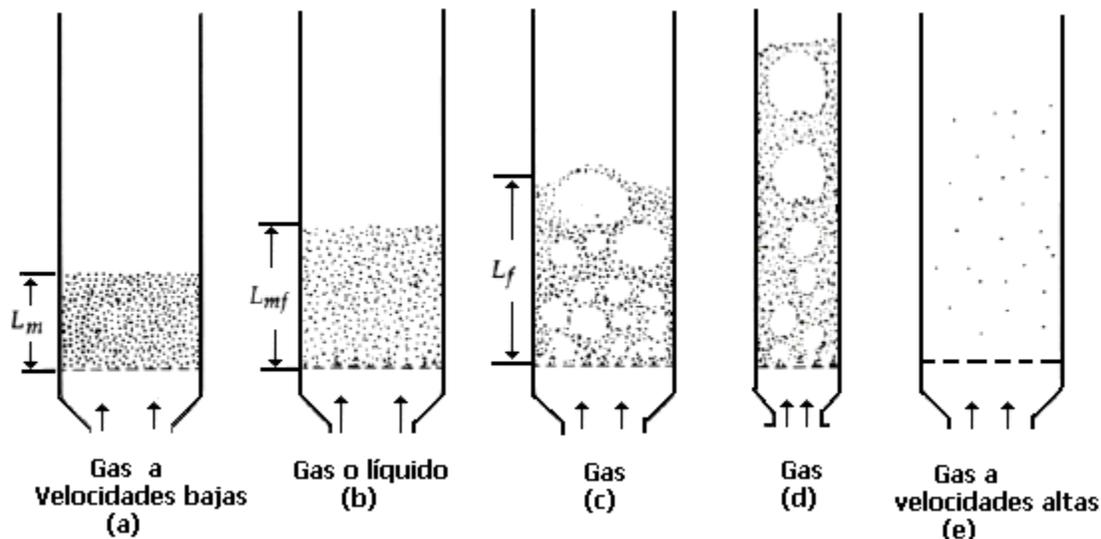


Figura 1.7.1 Regímenes de fluidización; **a.** lecho fijo, **b.** lecho a la mínima de fluidización, **c.** fluidización de borboteo, **d.** fluidización de segregación, **e.** transporte neumático (Kunii y Levenspiel, 1991).

1.7.2 Clasificación de partículas

Es importante mencionar que el comportamiento de la fluidización depende del tipo de partícula, se puede clasificar en términos de la diferencia de densidades (partícula-gas) y el diámetro promedio de las partículas formando cuatro grupos, mostrados en la Figura 1.7.2 (Kunii y Levenspiel, 1991).

Grupo A: son materiales de tamaño de partícula medio pequeño y de baja densidad de partícula ($< 1.4 \text{ gr/cm}^3$), estos sólidos fluidizan fácilmente a bajas velocidades del gas y la formación de burbujas es controlada a altas velocidades del gas.

Grupo B: son sólidos parecidos a la arena, la mayoría de las partículas de un diámetro promedio de 40 a 500 μm y con una densidad de partícula de 1.4 a 4 gr/cm^3 . Estos sólidos fluidizan bien con vigorosa acción de burbujeo y presentan un régimen burbujeante de fácil fluidización.

Grupo C: las partículas de este tipo son polvos finos o cohesivos. La fluidización normal en estos sólidos es extremadamente difícil porque las fuerzas entre

partículas son más grandes que el resultado de la acción del gas. Polvos faciales y algunos almidones son tipos de estos sólidos.

Grupo D: partículas grandes y/o densas. Lechos grandes de estas partículas son difíciles de fluidizar y su comportamiento da la formación de burbujas grandes y explosivas, algunos ejemplos son los guisantes y los granos de café (Kunii y Levenspiel, 1991).

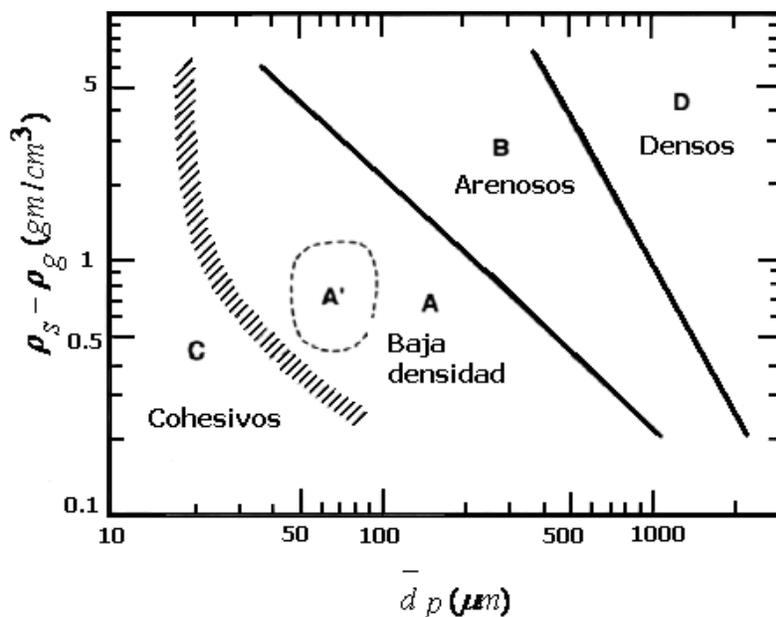


Figura 1.7.2 Clasificación de partículas a condiciones ambiente según Geldart (Kunii y Levenspiel, 1991).

1.7.3 Parámetros de fluidización

1.7.3.1 Diámetro de partícula

Estrictamente hablando, la mayoría de las partículas son irregulares por lo que el diámetro equivalente de una partícula esférica (d_p) se define como el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula (Kunii y Levenspiel, 1991).

1.7.3.2 Esfericidad

La esfericidad ϕ_s se define como la relación entre la superficie de esta esfera y la superficie real de la partícula (McCabe *et al.*, 2002).

$$\phi_s = \left(\frac{\text{Superficie de la esfera}}{\text{Superficie de la partícula}} \right)_{\text{volumen}} \quad (1.4)$$

Donde $\phi_s = 1$ para partículas esféricas, y $0 < \phi_s \leq 1$ para el resto de las partículas no esféricas.

1.7.3.3 Densidad de la partícula

Se conocen tres tipos de densidades: la densidad empacada o densidad formada por el sólido y su fracción de espacios vacíos tomadas como un todo; la densidad aparente o densidad del sólido aislada del aire que puede interferir en su determinación, la cual se obtiene a partir de métodos volumétricos y gravimétricos, cuya aplicación en el campo de la fluidización es necesaria. Finalmente la densidad real que se obtiene a partir del volumen real, eliminando espacios intra e interpartículas (Caballero, 2006).

1.7.3.4 Vel. Mínima de fluidización

La velocidad mínima de fluidización se observa cuando la mezcla en el lecho es totalmente homogénea. Para un lecho con partículas descansando sobre la placa distribuidora, la fluidización inicia cuando las fuerzas de arrastre del aire, igualan al peso de partículas. De tal forma que la fracción de espacios vacíos mínimos de fluidización ε_{mf} es mayor a la fracción del lecho fijo y puede estimarse si se determina adecuadamente el incremento en el volumen provocado por el aumento del flujo de aire. Si esto sucede la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) puede obtenerse de acuerdo a la siguiente expresión (Kunii y Levenspiel, 1991).

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \right) = d_p^3 \rho_g \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\mu_g^2} \right) g \quad (1.5)$$

Donde ϕ_s representa la esfericidad de la partícula de trigo; ε_{mf} es la fracción de espacios vacíos a la mínima fluidización; μ_g es la viscosidad del gas a las condiciones de operación; ρ_g es la densidad del gas a presión y temperatura de operación; ρ_p es la densidad aparente; d_p es el diámetro de partícula promedio del

material y finalmente la variable a obtener es la velocidad mínima de fluidización U_{mf} .

1.7.3.5 Caída de Presión a la mínima fluidización

En un lecho fluidizado la caída de presión a la velocidad mínima de fluidización (ΔP_{mf}) se observa cuando al aumentar la velocidad del aire en el lecho, las partículas comienzan a separarse lo suficiente entre sí, provocando que las caídas de presión vayan en aumento hasta llegar a un máximo valor para después, con aún más altas velocidades desciendan y se mantengan constantes. Es en este periodo de transición entre el valor máximo de las caídas de presión al valor que baja y se hace constante es en donde se manifiesta la caída de presión a la mínima fluidización. A partir de aquí comienza la verdadera fluidización.

1.7.3.6 Fracción de espacios vacíos a la mínima fluidización

La fracción de espacios vacíos son los huecos o intersticios por los que el aire fluye a través del lecho, están presentes aunque el lecho se encuentre fijo y su valor se incrementa con el incremento de la velocidad del gas; esto sucede cuando el lecho empacado comienza a fluidizar dejando que cada vez más aire entre por los huecos provocando que la fracción de espacios vacíos cada vez sea mayor, de tal forma que cuando las caídas de presión indican la variación entre el valor máximo a un valor inferior que se mantiene constante, la fracción de espacios vacíos cambia de ϵ_m a ϵ_{mf} .

1.7.3.7 Altura del lecho a la mínima de fluidización

La altura del lecho a la mínima de fluidización (L_{mf}) sigue el concepto de velocidad mínima de fluidización y la fracción de espacios vacíos a la mínima de fluidización, en el que a cierta velocidad del gas, las caídas de presión muestran una variación de un valor máximo a uno constante e inferior. Y al igual que en los conceptos anteriores es ahí donde se considera la altura del lecho a la mínima de fluidización. Estas caídas se pueden observar físicamente en el lecho cuando se ve un ligero movimiento de las partículas y con esto se da una ligera alza en la altura del lecho.

Una vez fluidizado el lecho las caídas de presión permanecerán constantes, pero la altura del lecho seguirá aumentando proporcionalmente con la velocidad del gas suministrado (Kunni y Levenspiel, 1991).

1.7.4 Ventajas del secado en lecho fluidizado

- Se obtiene una mezcla homogénea entre el sólido y el gas, debido a la elevada área superficial de contacto, lo cual provoca que todas las partículas se sequen de igual manera mediante la transferencia de calor (Singh y Heldman, 1998).
- Ofrece un mejor mecanismo de difusión de calor entre las partículas en el lecho y el gas, debida al mezclado intensivo (Srinivasa Kannan *et al.*, 2006).
- Facilidad de manipulación y transporte de los sólidos fluidizados, así como control adecuado de temperaturas, evitando posibles degradaciones térmicas en sólidos biológicos y alimenticios (Srinivasa Kannan *et al.*, 2006; Caballero, 2006).
- Alta capacidad de separación de las partículas ya secas y elevada conductividad térmica interna efectiva en el interior de la cámara de tratamiento (De la Fuente *et al.*, 2004).

1.7.5 Desventajas del secado en lecho fluidizado

- Un aumento de 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 (Caballero, 2006).
- 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 recuperaciones periódicas de finos (Senadeera *et al.*, 2005).

La principal limitación al uso de los lechos fluidizados es el tamaño de partícula admisible para lograr un secado eficaz, ya que partículas muy grandes provocan asentamiento o deposición (Kudra y Mujumdar, 2002; Singh y Heldman, 1998; De la Fuente *et al.*, 2004).

Capítulo 2: Justificación

Justificación

La industria alimentaria actual se enfoca en la optimización y desarrollo de productos de fuentes naturales mínimamente procesados, esto va de la mano con la tendencia del consumidor actual a optar por productos saludables. Al ser el trigo la principal fuente de proteína vegetal en la alimentación humana porque contiene niveles más altos de proteína que el arroz o el maíz, ha sido a lo largo de la historia, un alimento básico usado para: harina de levadura, panes, pastas y fermentados para bebidas como la cerveza por mencionar algunos.

Actualmente el trigo ha desarrollado un potencial económico e industrial enorme, muestra de esto es el interés que existe en incrementar las extensiones de tierra destinadas a cultivar cereales, específicamente trigo. Esto con el fin de proporcionar mayores volúmenes de alimentos para la población que se incrementa de forma acelerada.

Aunado a este incremento en la producción deben existir métodos para optimizar su almacenamiento y con esto aprovechar la mayor cantidad posible. Este trabajo se enfoca al estudio de secado de trigo, al ser un cereal con alta demanda y gran resistencia para ser cultivado en diferentes entornos. Por lo que resulta de vital importancia hacer un estudio del proceso de secado de trigo que permitirá tenerlo en condiciones óptimas para ser usado como insumo en diferentes procesos productivos.

Capítulo 3: Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología teórica-experimental para determinar la cinética de secado de granos de trigo en un secador de lecho fluidizado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener propiedades fisicoquímicas útiles en el secado de trigo como densidad empacada, densidad aparente y diámetro promedio de partícula.
- Obtener parámetros hidrodinámicos útiles en el proceso de fluidización.
- Determinar la velocidad mínima de fluidización.
- Obtener cinéticas del proceso de secado de trigo experimentalmente.
- Determinar coeficientes de difusividad efectiva y energía de activación.

Capítulo 4: Pregunta De Investigación

Capítulo 4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿La ley de Fick representa adecuadamente el mecanismo de transferencia de masa que se lleva a cabo en el proceso de secado de trigo en un lecho fluidizado?

Capítulo 5: Metodología

Capítulo 5. Metodología

5.1 Material

Para la fase de experimentación se contó con granos de trigo y aceite vegetal comercial (1-2-3®), que fueron adquiridos en un mercado de la ciudad de Toluca. Además para realizar las mediciones de los granos se utilizó un vernier.

5.2 Equipo experimental

El equipo principal para la obtención de las curvas de secado consta de un secador de acrílico con paredes aisladas y una placa distribuidora con orificios en arreglo triangular el cual se muestra en la Figura 5.1, el secador se alimentó con una corriente de aire por medio de un compresor, dicha corriente se reguló por medio de un rotámetro que permite una alimentación de 0.028 a 0.425 m³ estándar por minuto a 391.9 kPa.

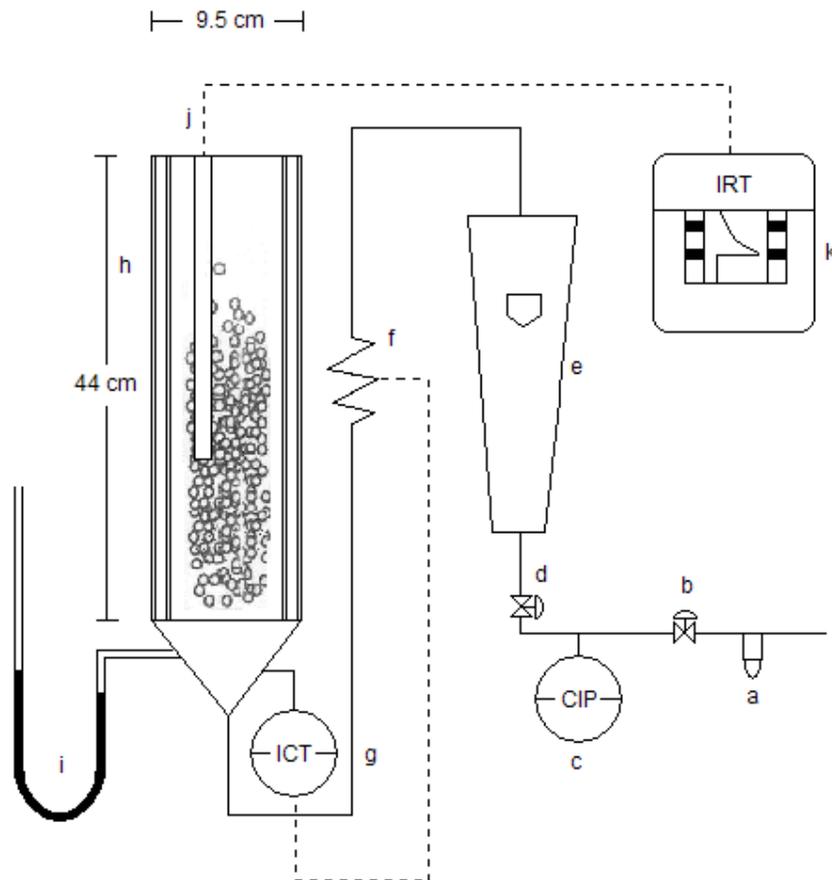


Figura 5.1 Arreglo y disposición del lecho fluidizado, el cual consta de los siguientes dispositivos: **a.** trampa de condensados, **b.** válvula reguladora del flujo de aire, **c.** manómetro, **d.** válvula reguladora de aire, **e.** rotámetro, **f.** batería de resistencias eléctricas, **g.** regulador de corriente de temperatura, **h.** secador de lecho fluidizado con paredes aisladas, **i.** manómetro tipo "u", **j.** termopar espárrago unido al registrador **k** con un aparato de pluma.

5.3 Determinación de las propiedades físicas

5.3.1 Dimensiones características de la partícula

Para obtener el diámetro efectivo promedio de partícula (d_p) del grano de trigo se tomaron 9 granos y mediante el uso de un vernier se midió el largo, ancho y alto ($l \times h \times b$), indicados en la figura 5.2, de cada uno de ellos para obtener el diámetro

efectivo con la ecuación 5.1 para cada grano (d_{ef}), y se promediaron para obtener el diámetro promedio efectivo, marcado como d_e .

$$d_{ef} = \left(\frac{4}{\pi} * b * h \right)^{1/2} \quad (5.1) \text{ (Kunii y Levenspiel, 1991)}$$

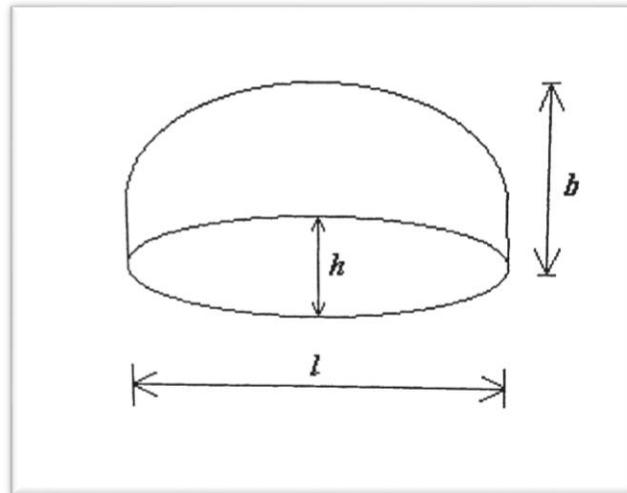


Figura 5.2 Diagrama de las medidas a un grano de trigo

Para el diámetro promedio de partícula (d_p) se utilizó la fórmula 5.2 (Bakker-Arkema et al; 1978).

$$d_p = \left[\frac{6 * M_c}{n * \pi * \rho_p} \right]^{1/3} \quad (5.2)$$

Donde:

M_c = Peso del trigo empacado (Kg)

n = número de granos empacados

ρ_p = Densidad aparente

5.3.2 Fracción de espacios vacíos

Con granos secos empacados en una probeta volumétrica de 25 mL, se desplazó el espacio de la probeta con un líquido (aceite de cártamo) hasta lograr el afore, obteniendo el volumen de los espacios vacíos con la fórmula 5.3.

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_T} \quad (5.3)$$

Donde:

ε = Fracción de espacios vacíos [adimensional]

V_a = Volumen del líquido de afore [cm³]

V_T = Volumen total de la probeta [cm³]

5.3.3 Esfericidad

Para determinar la esfericidad (ϕ_s) de los granos de trigo, se utilizó la fórmula 5.4.

$$\phi_s = \frac{d_e}{d_p} \quad (5.4)$$

5.3.4 Densidad empacada

Se colocaron los granos de trigo en una probeta de 25 mL hasta ocupar el volumen total y la masa que llena este volumen se pesó en una balanza analítica (Mettler Toledo, mod PB1501-S).

La densidad empacada se obtiene dividiendo el peso del trigo empacado entre el volumen total ocupado por el sólido como se muestra a continuación:

$$\rho_b = \frac{M_c}{V_t} \quad (5.5)$$

Donde:

ρ_b = Densidad empacada [kg/m³]

M_c = Peso del sólido empacado [kg]

V_T = Volumen total de la probeta [m³]

5.3.5 Densidad aparente

En una probeta se colocaron sólidos hasta un volumen conocido y la masa del cereal que llenó este volumen se pesó en una balanza analítica. Posteriormente se procedió a medir el volumen de los huecos añadiendo aceite comestible al sistema anteriormente descrito.

Esta densidad aparente se obtiene dividiendo el peso del cereal empacado entre el volumen corregido, el cual es obtenido al eliminar el volumen correspondiente a los espacios vacíos entre partículas del volumen total de la probeta.

$$\rho_p = \frac{M_c}{V_m} \quad (5.6)$$

$$V_m = V_t - V_h \quad (5.7)$$

Donde:

ρ_p = Densidad aparente [kg/m³]

M_c = Peso del sólido empacado [kg]

V_m = Volumen corregido [m³]

V_t = Volumen total de la probeta [m³]

V_h = Volumen de espacios vacíos [m³]

5.4 Determinación de propiedades hidrodinámicas

5.4.1 Velocidad mínima de fluidización

La velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) se observa cuando la mezcla en el lecho es totalmente homogénea, se puede obtener matemáticamente mediante la ecuación (1.5) donde la esfericidad es ϕ_s , la viscosidad del gas (μ_g) son a condiciones de operación, la densidad del gas (ρ_g) es a presión y temperatura de operación y la densidad (ρ_p) es la densidad aparente.

5.4.2 Régimen de fluidización

De acuerdo a la Figura 1.7.2 las partículas caen en diferentes regímenes de fluidización de acuerdo a su tamaño, en pequeñas o grandes. Esto para cualquier sólido de densidad ρ_s conocida y un diámetro promedio de partícula d_p (Kunii y Levenspiel, 1991).

La obtención del régimen de fluidización también puede ser obtenida utilizando las siguientes expresiones:

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2} \right]^{1/3} \quad (5.10)$$

Donde:

d_p^* = Diámetro de partícula [Adimensional]

d_p = Diámetro de partícula [m]

ρ_g = Densidad del gas [kg/m³]

$\rho_s = \rho_p$ = Densidad de la partícula [kg/m³]

μ_g = Viscosidad del gas

g = Aceleración de la gravedad 9.81 [m/s²]

$$U^* = U \left[\frac{\rho_g^2}{\mu_g (\rho_s - \rho_g) g} \right]^{1/3} \quad (5.11)$$

Donde:

U^* = Velocidad del gas [Adimensional]

U = Velocidad del gas [m/s]

Con los valores de las ecuaciones (5.10) y (5.11) es posible ubicar el régimen de fluidización.

5.5 Cinética de secado

Para este experimento se utilizó el equipo de lecho fluidizado que se muestra en la Figura 5.1. Se realizaron pruebas a tres diferentes temperaturas (40, 70, y 100 °C) y tres cantidades de granos alimentados al secador (0.8, 1.0 y 1.2 kg en base seca) y un flujo de aire de 0.35 m³/s.

Para la determinación de la humedad, a diversos intervalos de tiempo se tomaron muestras de aproximadamente 0.01 kg de trigo, con la ayuda de un muestreador. Estas muestras fueron almacenadas herméticamente para determinar su humedad utilizando una estufa de convección forzada (marca: Riossa, Ciudad de México) para dicho propósito.

5.6 Determinación de propiedades de transporte

5.6.1 Coeficiente de difusividad efectiva

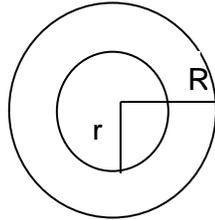
El principal mecanismo en el secado de sólidos es la difusión, esta toma lugar dentro de la estructura del mismo, ya sea en los poros, capilares o huecos, por lo que el mecanismo real de la misma es complicado. Para intentar describir el mecanismo de difusión en el interior del sólido sin tomar en cuenta el tortuoso camino de los poros, capilares o huecos, sino la difusión media de la humedad contenida en el

sólido en función de un coeficiente de difusividad efectiva se hizo uso de la segunda ley de Fick para una geometría esférica y suponiendo una concentración de humedad superficial constante (De Lima *et al.*, 2001; Gebhart, 1999; Crank, 1975).

La segunda ley de Fick está expresada por:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \quad (5.12)$$

Ya que la partícula de trigo se consideró esférica, asumiendo que el diámetro efectivo del grano de trigo se asemejó a esta geometría y de esta manera plantear las siguientes condiciones de frontera.



Condición de inicial: en $t = 0$ $0 \leq r \leq R$ $X = X_0$

Condición de frontera I: en $r = 0$ $t > 0$ $X = X_0$

Condición de frontera II: en $r = R$ $t > 0$ $X = X_e$

$$M = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-n^2 \pi^2 D_{eff} \frac{t}{R^2}\right] \quad (5.13) \text{(Welty, 2005)}$$

Donde:

M = Contenido de humedad teórica [adimensional]

D_{eff} = Coeficiente de difusividad efectiva

X_t = Contenido de humedad teórica a un tiempo t [kg H₂O/kg s.s.]

X_0 = Contenido de humedad inicial [kg H₂O/kg s.s.]

X_e = Contenido de humedad en el equilibrio [kg H₂O/kg s.s.]

R = Radio de la partícula [m]

t = tiempo [min]

El algoritmo para calcular los coeficientes de difusividad efectiva promedio es el siguiente:

1. Obtener experimentalmente las curvas de secado isotérmicas a diferentes temperaturas (40, 70, y 100°C).
2. Determinar:

$$M_{\text{exp}} = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} \quad (5.14)$$

Donde:

M_{exp} = Relación de humedad experimental [adimensional]

X_t = Contenido de humedad a un tiempo específico [kg H₂O/kg s.s.]

X_e = Contenido de humedad en el equilibrio [kg H₂O/kg s.s.]

X_o = Contenido de humedad inicial [kg H₂O/kg s.s.]

3. Suponer un valor de D_{eff} usando los primeros 50 términos de la serie de Fourier y calcular M con la ecuación (5.13).
4. Comparar M_{exp} con M , y si:

$|M - M_{\text{exp}}| > 1 \times 10^{-10}$ regresar al paso 3 del algoritmo, suponer otro coeficiente de difusividad y repetir el procedimiento.

$|M - M_{\text{exp}}| < 1 \times 10^{-10}$ termina el cálculo, y considerar como el último valor supuesto como el D_{eff} verdadero.

5.6.2 Energía de activación

La energía de activación para el proceso difusivo (E_a) se determinó calculando un D_{eff} para cada tratamiento de partícula, el cual es dependiente de la temperatura y sigue una relación tipo Arrhenius (Pérez-Alonso et-al; 2011).

El procedimiento para determinar E_a es el siguiente:

1. Obtener para cada tratamiento de partícula una gráfica X versus D_{eff} para cada temperatura de secado isotérmico.
2. Determinar para cada tratamiento de partícula una difusividad efectiva promedio ($\overline{D_{eff}}$) en el intervalo de temperaturas experimental con la siguiente ecuación:

$$\overline{D_{eff}} = \frac{\int_{X_0}^{X_1} D_{eff}(X) dX}{\int_{X_0}^{X_1} dX} \quad (5.15)$$

Donde:

X_1 = Contenido de humedad final [kg H₂O/kg s.s.]

$D_{eff}(X)$ = Coeficiente de difusividad efectivo a un contenido de humedad específico [m²/s]

3. Usar la siguiente relación tipo Arrhenius:

$$\overline{D_{eff}} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] \quad (5.16)$$

Donde:

D_0 = Factor de Arrhenius [m²/s]

E_a = Energía de activación [kJ/mol]

R = Constante universal de los gases (8.314×10^{-3} kJ/mol K)

T = temperatura [K]

4. Graficar $\ln \overline{D_{eff}}$ vs $1/T$, esta formará una línea recta con pendiente E_a/R , la cual al ser multiplicada por R da el valor de la energía de activación.

5.7 Determinación de propiedades termodinámicas

5.7.1 Capacidad calorífica

En una sustancia el calor propagado por diferencia de temperatura dependerá de las condiciones constantes de presión o volumen (Mohsenin, 1980). Para materiales agrícolas como el trigo, este calor se considera constante a menos que se trabaje a condiciones de presiones extremas.

Con la modernización instrumental es posible la utilización de un calorímetro diferencial de barrido (DSC). El procedimiento es medir pequeños efectos térmicos provenientes de procesos térmicos registrados en una gráfica llamada termograma que muestra pérdidas o ganancia de energía detectadas por el equipo, dada la tasa de incremento en temperaturas previamente seleccionada (García, 2006).

El área del termograma es proporcional al calor absorbido o liberado durante el proceso de calentamiento o enfriamiento. El sistema consiste de dos contenedores, uno para la muestra y el otro para el material de referencia; un programador de temperatura y un registrador. Es conveniente encapsular las muestras debido a la presencia de humedad en los materiales.

La importancia de esta técnica es la precisión de las determinaciones si el aparato se encuentra calibrado, otra ventaja es que el análisis de los termogramas indica posibles descomposiciones en el rango de estudio y por consiguiente la obtención de productos de calidad.

La capacidad calorífica del trigo se determinó por medio de un calorímetro diferencial de barrido (DSC) (TA Instruments modelo 2010), el cual se muestra en la Figura 5.4, que se controla mediante un software comercial. El aparato es previamente calibrado y se utiliza el elemento indio como material de referencia.

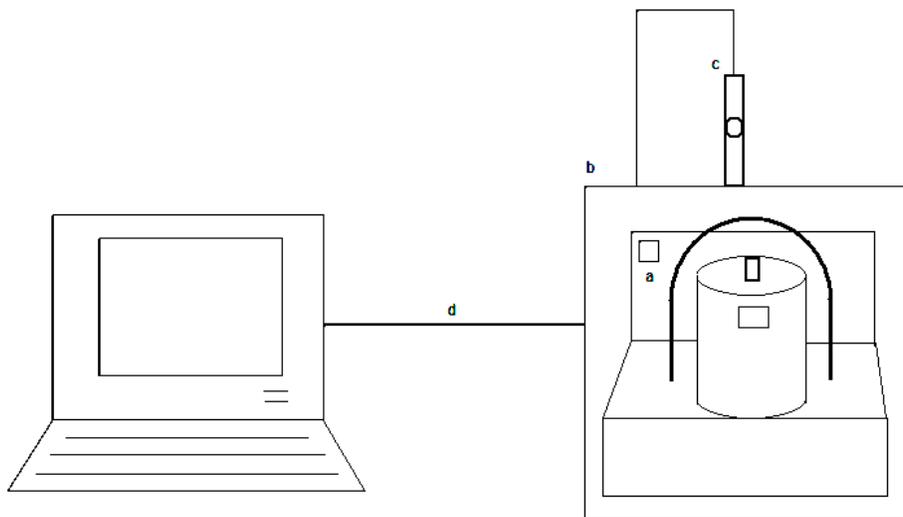


Figura 5.4 Calorímetro diferencial de barrido, consta de:

- a. calorímetro cilíndrico, b. panel de control, c. rotámetro, d. una interfaz a la computadora.

5.8 Balance de materia y energía

Uno de los cálculos principales en el diseño de equipos de secado son los balances de materia y energía, las ecuaciones de estos balances se desarrollan a continuación:



Figura 5.5 Esquema del equipo de lecho fluidizado

Donde el flujo de aire (G) es constante, mientras que el sólido (W) permanece dentro del secador, hasta terminar la operación, por lo que las flechas de entrada y salida del sólido en la Figura 5.5 solo indican los cambios en la función (X) y la temperatura (T) antes y después de la operación de secado.

5.8.1 Ecuación del balance de materia en función de la humedad

De acuerdo a la Figura 5.5, la realización del balance de materia en función de la humedad queda igualando la masa de aire que entra, a la masa de humedad que gana del sólido como se muestra en la siguiente ecuación:

$$G(Y_f - Y_0) = -W \left(\frac{dX}{dt} \right) \quad (5.17)$$

Donde:

$$G = \text{flujo másico del gas} \left[\frac{\text{kg de aire seco}}{s} \right]$$

$$G = Q \cdot \rho_{\text{aire}} = U_{mf} \cdot A \cdot \rho_{\text{aire}} \quad (5.18)$$

Donde:

$$Q = \text{flujo másico del aire} \left[\frac{\text{kg}}{s} \right]$$

$$U_{mf} = \text{velocidad mínima de fluidización} \left[\frac{m}{s} \right]$$

A = área del secador [m^2]

$$\rho_{\text{aire}} = \text{densidad del aire a condiciones de operación} \left[\frac{\text{kg}}{m^3} \right]$$

$$Y_f = \text{humedad final del aire} \left[\frac{\text{kg de } H_2O}{\text{kg de aire seco}} \right]$$

$$Y_0 = \text{humedad inicial del aire} \left[\frac{\text{kg de } H_2O}{\text{kg de aire seco}} \right]$$

$W =$ masa del sólido seco [kg]

$$-\left(\frac{dX}{dt}\right) = \text{cinética de secado} \left[\frac{\text{kg de } H_2O}{\text{kg de sólido seco} \cdot s} \right]$$

5.8.2 Ecuación del balance de energía

De igual forma que el balance de materia, el balance de energía está representado por Entradas = Salidas, ya que no hay acumulación, ni generación, por lo que la ecuación que describe el balance de energía es el siguiente:

$$GH_{a0} + WH_{s0} = GH_{af} + WH_{sf} \quad (5.19)$$

$$H_a = C_s(T_a - T) + \lambda Y \quad (5.20)$$

$$C_s = Cp_a + YCp_{H_2O(v)} \quad (5.21)$$

$$H_s = Cp_s(T_s - T) + X(t)Cp_{H_2O(l)}(T_s - T) \quad (5.22)$$

Donde:

$$G = \text{flujo másico del gas} \left[\frac{\text{kg de aire seco}}{s} \right]$$

$$H_a = \text{entalpía del aire} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg de aire seco}} \right]$$

$W =$ masa del sólido seco [kg]

$$H_s = \text{entalpía del sólido} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg de sólido seco}} \right]$$

$$C_s = \text{calor húmedo} \left[\frac{kJ}{kg \text{ de aire seco} \cdot K} \right]$$

$$\lambda = \text{calor latente de vaporización} \left[\frac{kJ}{kg \text{ de agua}} \right]$$

$$Y = \text{humedad del aire} \left[\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de aire seco}} \right]$$

$$X(t) = \text{humedad del sólido a un tiempo determinado} \left[\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}} \right]$$

$$T_a = \text{temperatura del aire [K]}$$

$$T_s = \text{temperatura del sólido [K]}$$

$$T = \text{temperatura del referencia [K]}$$

$$C_{p_a} = \text{capacidad calorífica del aire seco} \left[\frac{kJ}{kg \text{ de aire seco} \cdot K} \right]$$

$$C_{p_{H_2O(v)}} = \text{capacidad calorífica del agua en estado vapor} \left[\frac{kJ}{kg \text{ de agua} \cdot K} \right]$$

$$C_{p_{H_2O(l)}} = \text{capacidad calorífica del agua en estado líquido} \left[\frac{kJ}{kg \text{ de agua} \cdot K} \right]$$

Sustituyendo las ecuaciones (5.17), (5.18) y (5.19) en la relación tipo Arrhenius (5.16), la ecuación del balance de energía queda de la siguiente forma:

$$G \left\{ C_{p_a} + (Y_f - Y_0) C_{p_{H_2O(v)}} \right\} (T_{af} - T_{a0}) + \lambda (Y_f - Y_0) \left. \right\} = W \left[(C_{p_{sf}} - C_{p_{s0}}) + \frac{dX}{dt} C_{p_{H_2O(l)}} \right] \frac{dT}{dt}$$

(5.23)

Donde:

$$G = \text{flujo másico del gas} \left[\frac{\text{kg de aire seco}}{s} \right]$$

$$W = \text{masa del sólido seco [kg]}$$

$$\lambda = \text{calor latente de vaporización} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg de agua}} \right]$$

$$Y_0 = \text{humedad del aire a la entrada} \left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}} \right]$$

$$Y_f = \text{humedad del aire a la salida} \left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}} \right]$$

$$X(t) = \text{humedad del sólido a un tiempo determinado} \left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right]$$

$$T_{a0} = \text{temperatura del aire a la entrada [K]}$$

$$T_{af} = \text{temperatura del aire a la salida [K]}$$

$$T_{s0} = \text{temperatura del sólido a la entrada [K]}$$

$$T_{sf} = \text{temperatura del sólido a la salida [K]}$$

$$Cp_a = \text{capacidad calorífica del aire seco} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg de aire seco} \cdot \text{K}} \right]$$

$$Cp_{s0} = \text{capacidad calorífica sólido a la entrada} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg de sólido seco} \cdot \text{K}} \right]$$

$$Cp_{sf} = \text{capacidad calorífica sólido a la salida} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg de sólido seco} \cdot \text{K}} \right]$$

$$Cp_{H_2O(v)} = \text{capacidad calorífica del agua en estado vapor} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg de agua} \cdot \text{K}} \right]$$

$C_{p_{H_2O(l)}}$ = capacidad calorífica del agua en estado líquido $\left[\frac{kJ}{kg \text{ de agua} \cdot K} \right]$

$\frac{dT}{dt}$ = cambio de temperatura respecto al tiempo [K/s]

Capítulo 6: Resultados y discusión

Resultados y discusión

6.1 Propiedades físicas

Se determinaron las propiedades físicas para los granos de trigo (Tabla 6.1), donde se aprecia un tamaño promedio de 0.004 metros, el cual es similar a diámetros de partícula observados para otros cereales y semillas como pimienta chica (0.005 m), maíz (0.006 m), alubia (0.006 m) y cilantro (0.004 m) (Patiño, 2004; Cabrera, 2004; García, 2006; Torrez, 2013). La fracción de espacios vacíos corresponde a 0.440 un valor muy similar al determinado por Giner y Calvelo (1987) quienes reportaron que la fracción de espacios vacíos tenía un valor de 0.450. Finalmente se presentó una esfericidad de 0.949 lo cual nos indica que se tienen geometrías relativamente uniformes con tendencias a ser esféricas, ya que es bien sabido que valores de esfericidad iguales a la unidad corresponden a partículas esféricas, mientras que para partículas con geometrías distintas (generalmente amorfas) se tendrán valores entre cero y la unidad.

Tabla 6.1 Características físicas de los granos de trigo

Diámetro de partícula	
d_p	0.004 m
Fracción de espacios vacíos	
ε	0.440
Esfericidad	
φ_s	0.949
Densidad aparente	
ρ_p	1363.7 kg/m ³
Clasificación de la partícula	
D	

Se encontró que la densidad aparente se encuentra en valores similares a los reportados algunos granos deshidratados empleando el mismo método de secado, por ejemplo, la alubia y el alverjón con densidades aparentes de 1360.210 kg/m³ y

1222.300 kg/m^3 , respectivamente (Patiño, 2004). Así mismo, se han reportado densidades aparentes menores para variedades de la pimienta como el caso de la pimienta gorda con 1017 kg/m^3 y la de la pimienta chica con 838.87 kg/m^3 (Patiño, 2004; García, 2006; Torrez, 2013).

Los granos de trigo se clasificaron empleando el diagrama de Geldart (Figura 1.7.2), las ecuaciones 5.11 y 5.12, obteniendo un grano de tipo *D*. Entre las características principales de esta tipología de grano destacan que si se tienen lechos grandes de estas partículas serán difíciles de fluidizar y su comportamiento dará como resultado la formación de burbujas grandes y explosivas (Kunii y Levenspiel, 1991).

6.2 Propiedades hidrodinámicas

Mediante la ecuación 1.5 se determinó matemáticamente la velocidad mínima de fluidización obteniéndose un valor de $U_{mf} = 1.286 \text{ m/s}$. Zahed et al. (1995) determinó experimentalmente la velocidad mínima de fluidización para granos de trigo con un diámetro promedio de partícula de 0.004 m obteniendo un valor de 1.340 m/s , lo cual comparado con este estudio se tiene una diferencia del 4.1% haciendo confiable la estimación matemática. Para el caso de otros granos se han reportado valores para lenteja de 1.340 m/s (Patiño, 2004), la pimienta gorda de 3.430 m/s (García, 2006), la pimienta chica de 2.060 m/s (Cabrera, 2004), y el alverjón de 2.25 m/s . Las diferencias entre los valores reportados para diferentes granos se deben principalmente a los tamaños de estos, ya que diámetros de partícula más pequeños presentaran velocidades mínimas de fluidización menores.

6.3 Cinética de secado

6.3.1 Curvas de secado

En las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se muestran las curvas del proceso de secado del trigo obtenidas para un lecho con cargas de 0.8 , 1.0 y 1.2 kg con contenidos de humedad conocidos a tres diferentes temperaturas de operación, mientras que los datos

experimentales obtenidos en las distintas corridas experimentales se encuentran tabulados en el Anexo A.

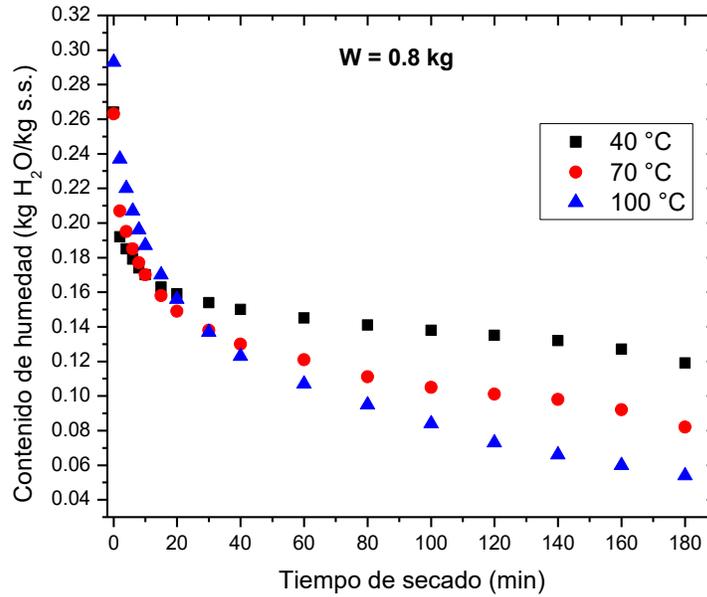


Figura 6.1: Cinética de secado del trigo para un lecho de 0.8 kg.

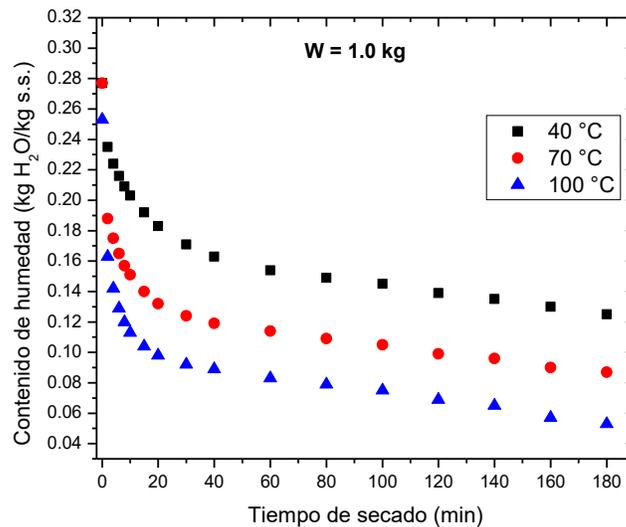


Figura 6.2: Cinética de secado del trigo para un lecho de 1.0 kg.

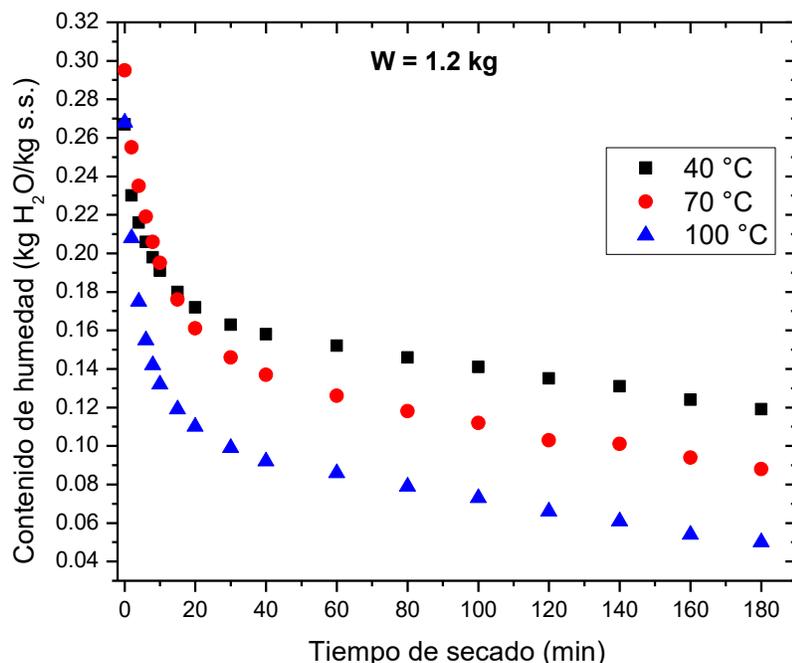


Figura 6.3: Cinética de secado del trigo para un lecho de 1.2 kg.

En las figuras 6.1-6.3 se puede apreciar que el incremento de la temperatura ejerce una notable influencia sobre la velocidad de secado, ya que a temperaturas mayores se logra una mayor remoción del contenido de humedad, debido al incremento en la movilidad de los moléculas de agua provocado por una energía cinética mayor resultado de un incremento en la temperatura de operación. Cabe recalcar, que para el caso de una carga menor (0.8kg), pero con las mismas condiciones de operación, con tiempos de secado menores a 20 minutos no se aprecia una tendencia muy clara respecto a la temperatura, esto puede atribuirse a la influencia que ejerce la velocidad mínima de fluidización sobre la cantidad de carga del lecho.

6.3.2 Curvas de rapidez de secado

El comportamiento del contenido de humedad de los granos en el lecho durante el proceso de secado es expresado mediante las curvas de rapidez de secado, y pueden presentar dos periodos de secado, a velocidad constante y a velocidad

decreciente. El periodo de velocidad constante presenta el mecanismo de transferencia de calor en la superficie del sólido por convección hacia el aire caliente y la transferencia de masa en la superficie hacia el gas caliente. El periodo de velocidad decreciente presenta mecanismos como la difusión del líquido debido al gradiente de concentración.

En las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6 se muestran las curvas de rapidez de secado a diferentes temperaturas (40, 70 y 100 °C) y cargas de lecho (0.8, 1.0 y 1.2 kg), estas se obtuvieron con los datos tabulados en el Anexo B. En estas Figuras se observa que no existe un periodo de secado constante por lo que el secado del trigo está determinado principalmente por un proceso difusivo donde se permite que la humedad interna se mueva hasta la superficie del grano tan rápido como se evapora. Un comportamiento similar se observó por Pérez-Alonso et al. (2011) durante el secado por lecho fluidizado de pimienta.

En las Figuras 6.4-6.6 se observa que la velocidad de secado independientemente de la temperatura decrece durante todo el proceso, esto demuestra que la remoción de humedad es directamente proporcional a la concentración de agua del trigo, permitiendo suponer que el contenido de humedad depende de la difusión efectiva por varios mecanismos simultáneos, que incluyen la acción capilar, la difusión del vapor a lo largo de las superficies internas y difusión a través de las paredes celulares y por lo tanto es posible modelar el proceso de secado del trigo mediante la segunda ley de Fick.

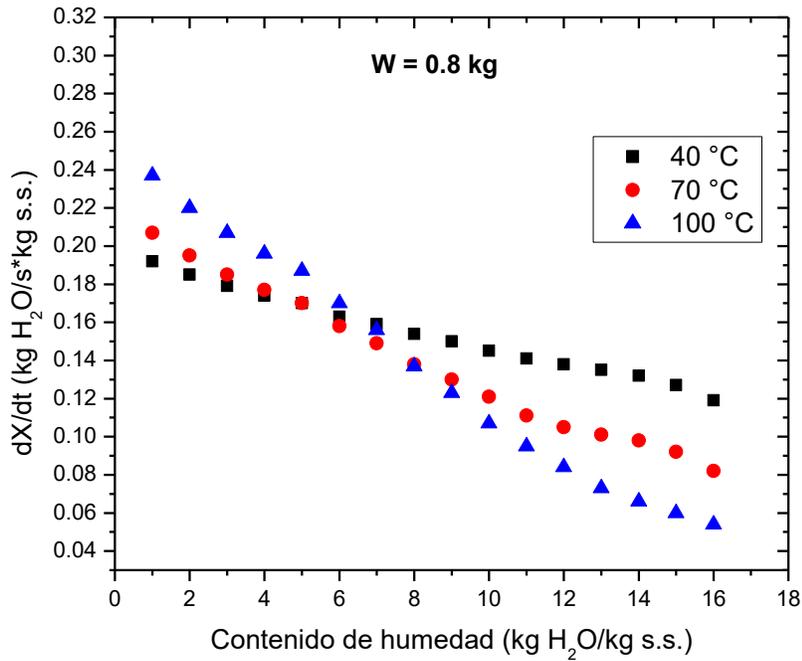


Figura 6.4 Velocidad de secado del trigo con una carga de lecho de 0.8 kg.

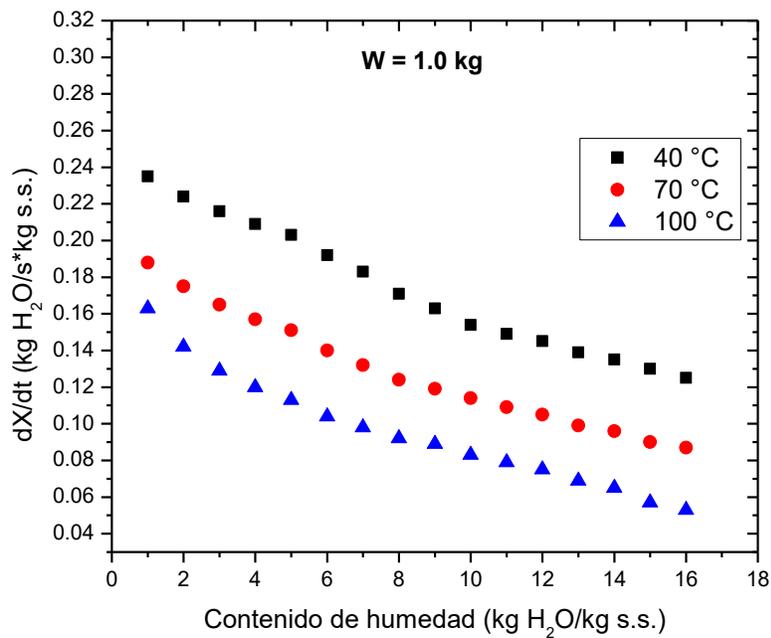


Figura 6.5 Velocidad de secado del trigo con una carga de lecho de 1.0 kg.

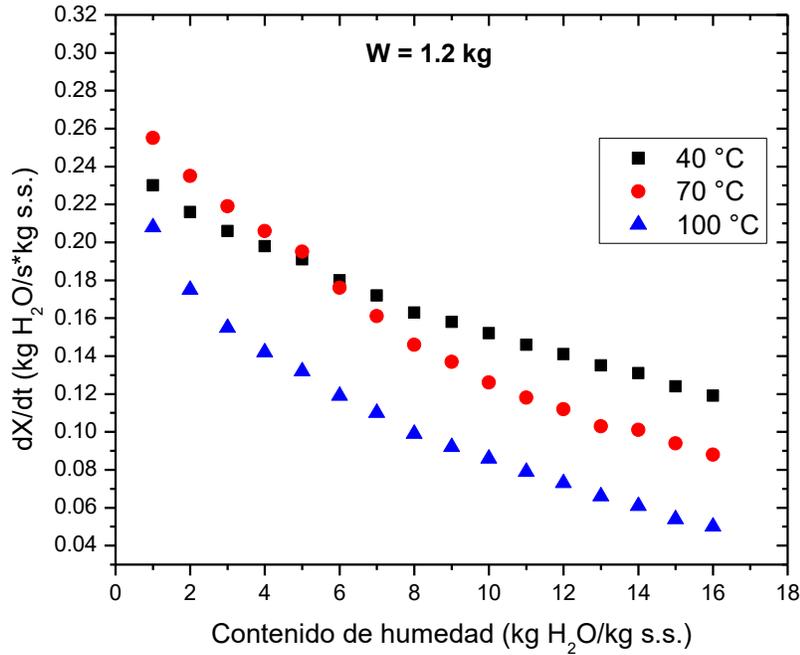


Figura 6.6 Velocidad de secado del trigo con una carga de lecho de 1.2 kg.

6.4 Propiedades de transporte

6.4.1 Difusividad efectiva

Los valores de la difusividad efectiva para cada valor de humedad obtenida experimentalmente a las temperaturas estudiadas (40, 70 y 100 °C) y a diferentes cargas iniciales (0.8, 1.0 y 1.2 kg) fueron determinados con ayuda del algoritmo (Anexo C) presentado en la sección 5.6.1. En el anexo D se presentan los resultados de la estimación de los coeficientes de difusividad efectiva para el trigo a las temperaturas y cargas estudiadas. Adicionalmente, se evaluaron los datos de contenido de humedad adimensional experimentales y teóricos (Tablas y gráficos en Anexo E).

Como es posible apreciarse en la figura 6.7 y el Anexo E, la estimación de los valores teóricos es muy similar a los obtenidos experimentalmente como resultado se da una superposición entre los valores experimentales y teóricos en los gráficos

lo cual nos permite concluir que el modelo propuesto para predecir el proceso de secado del trigo en un lecho fluidizado es satisfactorio.

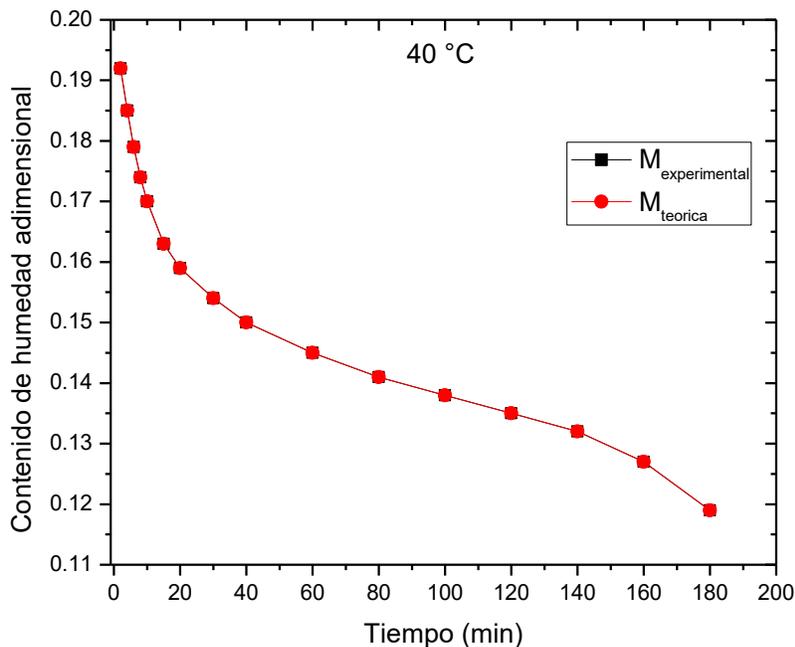


Figura 6.7 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 0.8 kg a 40 °C.

Kechaou y Maâlej (2000) emplearon métodos numéricos para obtener el valor del coeficiente de difusividad, en sus experimentos propusieron un método de solución en el que el valor obtenido de difusividad dependía de la temperatura y el contenido inicial de humedad. Giraldo-Zúñiga et al. (2006) secaron rodajas de jaca (fruto del Brasil), estos realizaron una comparación entre datos experimentales de pérdida de humedad y los obtenidos con el modelo basado en la ley de Fick; se pudo observar que el modelo fue el que más se acercó a los datos obtenidos experimentalmente.

Como los obtenidos por los investigadores antes mencionados, los valores de los coeficientes de difusión de este trabajo fueron calculados mediante la segunda ley de Fick y con la ayuda del programa MATLAB 2012a.

La tabla 6.2 muestra los coeficientes de difusividad promedio para las diferentes condiciones de operación en el lecho para el proceso de secado de trigo. Para una temperatura de 40 °C no se aprecia una tendencia clara de los valores para los coeficientes de difusividad efectiva promedio respecto a la carga inicial del lecho, sin embargo, a temperaturas elevadas (70 y 100 °C) se aprecia claramente que al incrementar la carga inicial del lecho los coeficientes de difusividad efectiva disminuyen, eso es, por que el mecanismo de difusión de humedad en las partículas del trigo durante el proceso de secado se ve obstaculizado cuando se incrementa la carga total del lecho, ya que los procesos de transferencia de calor por conducción y convección se ven disminuidos debido a que hay un mayor volumen de carga y disminuye el volumen total de las partículas de trigo. Mientras que para una temperatura de 40 °C la carga inicial no parece ser un factor de impacto durante el proceso de secado. Además, se aprecia que al incrementar la temperatura para una carga inicial fija, los coeficientes difusividad efectiva promedio incrementan, lo cual es lógico, ya que a temperaturas mayores el mecanismo de difusión se ve favorecido, ya que se incrementa la energía cinética de las moléculas de agua.

Tabla 6.2 Coeficientes de difusión promedio para el proceso de secado de trigo.

<i>T</i> (°C)	<i>Carga de lecho (kg)</i>		
	<i>0.8 kg</i>	<i>1.0 kg</i>	<i>1.2 kg</i>
	$\overline{D_{eff}} \text{ (m}^2\text{/s)}$	$\overline{D_{eff}} \text{ (m}^2\text{/s)}$	$\overline{D_{eff}} \text{ (m}^2\text{/s)}$
40	2.091E-09	1.893E-09	1.96E-09
70	2.630E-09	2.350E-09	2.197E-09
100	3.348E-09	2.738E-09	2.396E-09

Los coeficientes de difusividad efectiva promedio para el trigo son similares a los reportados para otros granos, como el maíz, el trigo y el arroz, cuyos coeficientes de difusión efectiva oscilan en valores de $0.11E-10 - 5.3E-10 \text{ m}^2/\text{s}$, $5.1E-10 - 2.2E-09 \text{ m}^2/\text{s}$, $1.3E-10 - 3.2E-09 \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente (Zogzas et al., 1996; Kundu et al., 2005; Perea-Flores et al., 2012), la soya $1.46-5.82E-9 \text{ m}^2/\text{s}$ (Torrez, 2013) y la pimienta con una difusividad efectiva de $2.354E-8 \text{ m}^2/\text{s}$ a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (García, 2006).

Se han estimado los coeficientes de difusión efectiva en otros alimentos dándoles geometrías específicas como cubos y cilindros, como el caso del plátano, cuya difusividad efectiva se encuentre en el intervalo de $1.65E-10 - 8.63 E-10 \text{ m}^2/\text{s}$ (De Lima et al., 2001), el murici, que es un fruto característico de Brasil, que cuenta con un difusividad efectiva de entre $1.28E-9$ a $2.91E-9 \text{ m}^2/\text{s}$ en un intervalo de temperaturas de 50 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (Giraldo-Zúñiga et al., 2006), la piña cuyo intervalo de coeficientes de difusividad es de $1.62E10-10$ a $1.25E-9 \text{ m}^2/\text{s}$ (Rahman y Lamb, 2004) o la papaya con difusividad efectiva de $1.72E-9 \text{ m}^2/\text{s}$ a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (El-Aouar et al., 2003).

6.4.2 Energía de activación

Al obtenerse los coeficientes promedio de difusividad efectiva de acuerdo al procedimiento establecido en la metodología (Capítulo 5) a continuación se determinó la energía de activación para las distintas condiciones estudiadas con la ecuación de Arrhenius.

En la Tabla 6.3 se muestran los datos obtenidos de graficar el $\overline{\ln D_{eff}}$ en función del inverso de la temperatura y realizar una regresión lineal, estos gráficos se muestran en el Anexo F y la figura 6.8.

Carga de lecho (kg)	E_a (kJ/mol)	r^2
0.8	7.589	0.99144
1.0	5.984	0.99531
1.2	3.270	0.9982

Tabla 6.3 Energía de activación para el proceso de secado de trigo a diversas cargas de lecho.

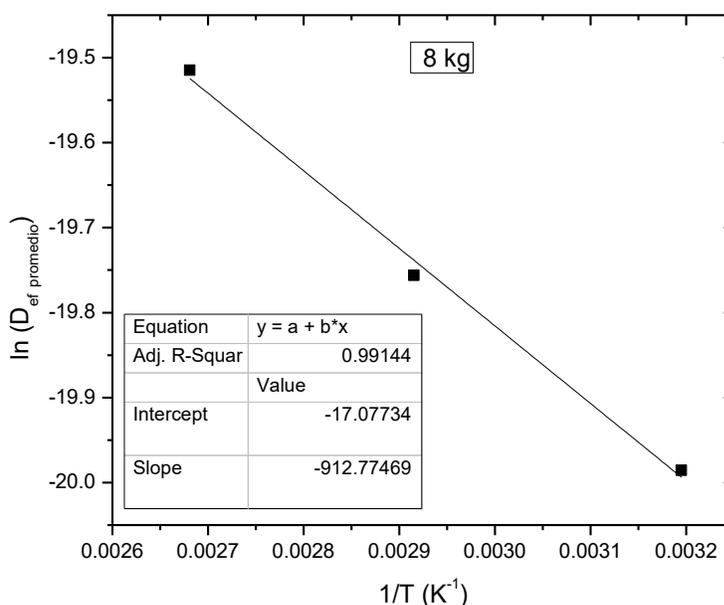


Figura 6.8 Regresión lineal de los datos de $\ln \overline{D_{eff}}$ y $1/T$ para una carga de 0.8 kg.

En la tabla 6.3 se corrobora que se presentó un buen ajuste lineal de los datos del coeficiente de difusión efectiva promedio a las tres temperaturas estudiadas (40, 70 y 100 °C) para los tres casos analizados (cargas de lecho inicial de 0.8, 1.0 y 1.2 kg) con valores de r^2 mayores a 0.99. En cuanto a la energía de activación, se observa una tendencia clara, ya que al incrementar la carga de lecho esta tiende a disminuir, esto es una indicación clara de que los mecanismos de difusión se ven favorecidos con unas cargas de lecho mayores (1.2 kg) en comparación con cargas

de lecho menores (0.8kg) para el proceso de secado mediante lecho fluidizado, debido a que los valores de E_a elevados se asocian con materiales donde el agua está fuertemente enlazada a la estructura del material y consecuentemente su remoción se encuentra dominada por la estructura de la muestra a secar (Perea-Flores et al., 2012)

Otros estudios han reportado valores similares para la energía de activación en el proceso de secado mediante lecho fluidizado, encontrando energías de activación en el rango de 15 a 95 kJ/mol para pistache (Kashaninejad et al., 2007), maíz (Ruiz et al., 2008), amaranto (Calzetta et al., 2004), frijol verde (Doymaz, 2005) y calabaza (Sacilik, 2007).

6.5 Determinación de propiedades termodinámicas

6.5.1 Capacidad calorífica

Muestras de trigo de 12 a 16 mg fueron sometidas a prueba, en un ambiente controlado con nitrógeno y con humedades de 0.2 y 0.05 respectivamente; con un intervalo de operación de 5 a $75\text{ }^\circ\text{C}$.

El calorímetro utilizado en estas pruebas permite fijar la velocidad de calentamiento, la rampa de calentamiento utilizada fue de $5\text{ }^\circ\text{C/min}$, posteriormente se sometió a la muestra a la temperatura constante de $75\text{ }^\circ\text{C}$ por 10 min . De tal forma que se obtuvo la capacidad calorífica para el intervalo de interés requerido.

Los datos obtenidos se encuentran tabulados en el Anexo G.

6.6 Balance de materia y energía

6.6.1 Balance de materia

De acuerdo al balance de materia descrito en la metodología, se evaluó el contenido de humedad final del aire (Y_f). Los datos obtenidos del contenido de humedad final

del aire (Y_f) se encuentran tabulados y graficados en el Anexo H y en las Figuras 6.9, 6.10 y 6.11.

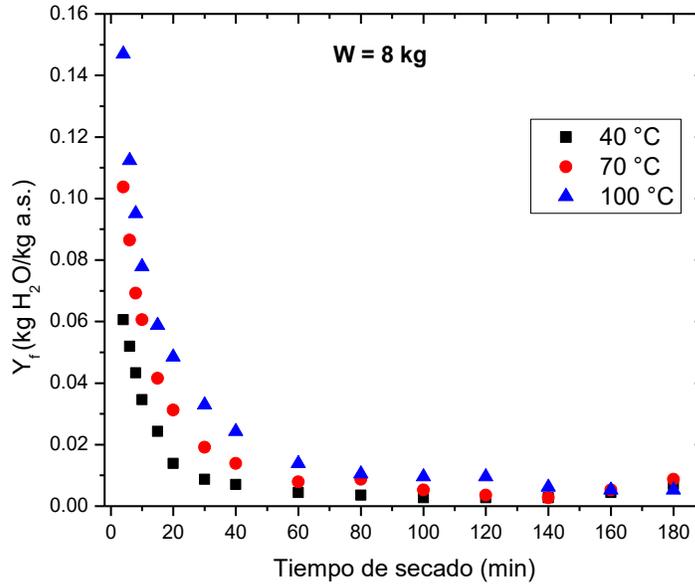


Figura 6.9 Contenido de H₂O en el aire a la salida del secador para una carga de 0.8 kg.

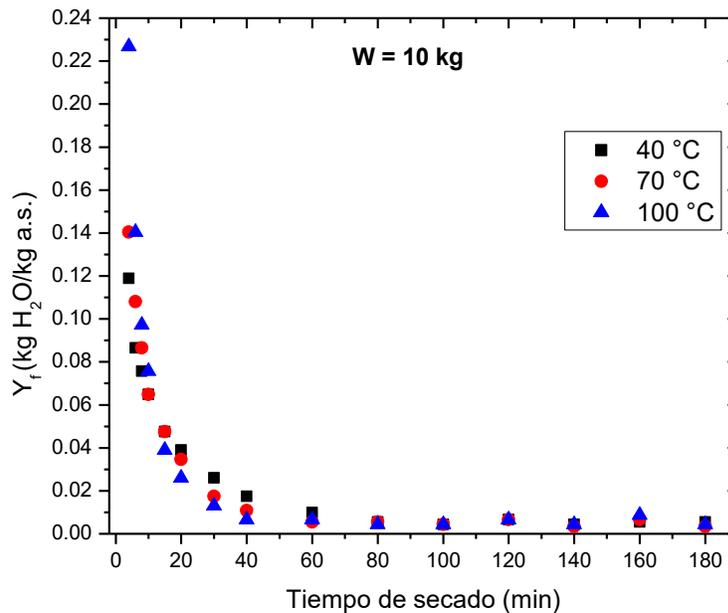


Figura 6.10 Contenido de H₂O en el aire a la salida del secador para una carga de 1.0 kg.

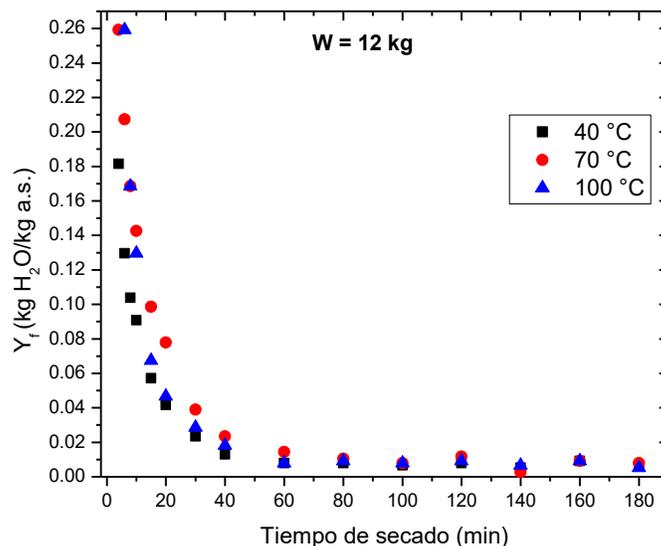


Figura 6.11 Contenido de H₂O en el aire a la salida del secador para una carga de 1.2 kg.

En el Anexo I se pueden ver las ecuaciones que se ajustan a los datos de Y_f obtenidos mediante el balance de materia, para las temperaturas de 40, 70 y 100 °C a las tres cargas de lecho inicial de 0.8, 1.0 y 1.2 kg. Estas son útiles para cuando se requiera encontrar la humedad del aire a la salida del secador a cualquier tiempo del que no se tengan datos experimentales.

6.6.2 Balance de energía

La ecuación (5.23) describe el balance de energía, de la cual se despeja el término $\frac{dT}{dt}$ del cambio de temperatura del sólido respecto al tiempo, y como se conocen todos los demás términos fue posible realizar este balance a las diferentes temperaturas y cargas de lecho.

Los datos obtenidos de este balance se encuentran tabulados y graficados en el Anexo J, y en el Anexo K se encuentran las ecuaciones que se ajustan a estos datos, las cuales son útiles para obtener la temperatura del sólido dentro del secador a cualquier otro tiempo que no se pueda calcular con los datos obtenidos experimentalmente.

En las Figuras 6.12, 6.13 y 6.14 se pueden ver los datos de temperatura del sólido dentro del secador, encontrados mediante el balance de energía donde la temperatura de entrada del sólido se tomó como la temperatura ambiente (20 °C).

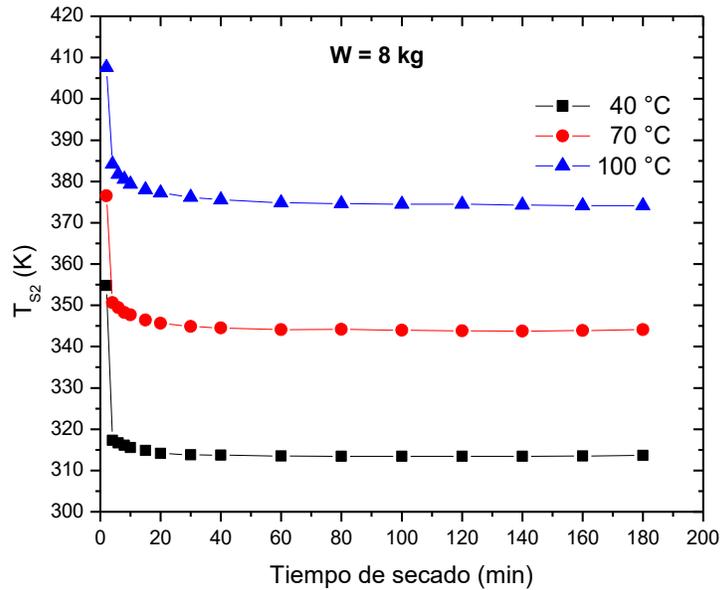


Figura 6.12 Temperatura del sólido a la salida del secador para una carga de 0.8 kg.

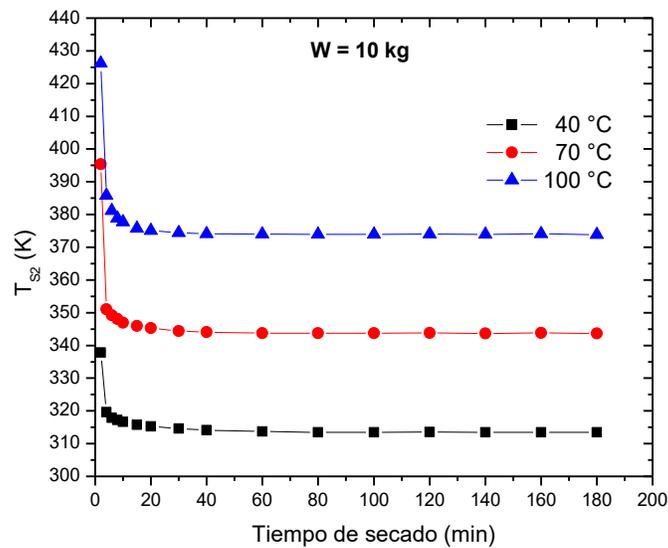


Figura 6.13 Temperatura del sólido a la salida del secador para una carga de 1.0 kg.

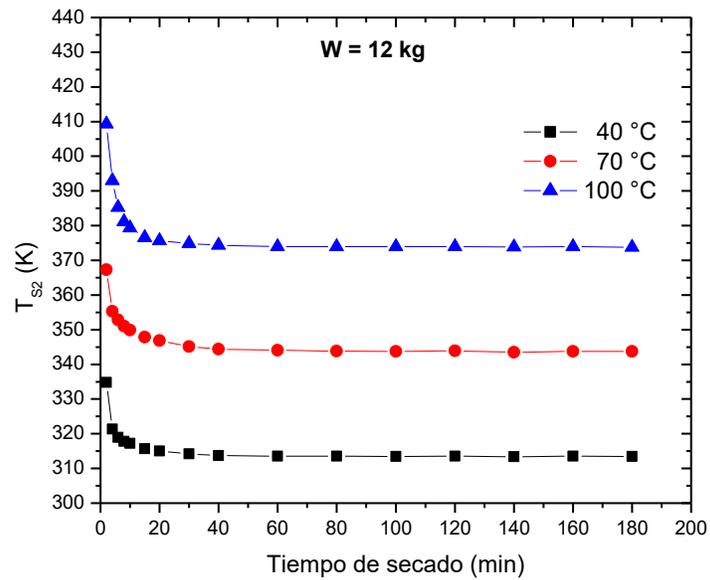


Figura 6.14 Temperatura del sólido a la salida del secador para una carga de 1.2 kg.

De acuerdo a las Figuras 6.12, 6.13 y 6.14 a medida que pasa el tiempo, la temperatura del sólido se incrementa, como es de esperarse, hasta que llega a la temperatura del aire que está circulando dentro del secador. Se puede ver que a una mayor velocidad de secado el sólido alcanza con mayor rapidez la temperatura del aire.

Capítulo 7: Conclusiones

Conclusiones

- Las propiedades físicas para los granos de trigo resultaron ser muy similares a las reportadas para otros granos como pimienta, maíz, alubia y cilantro con un tamaño promedio de 0.004 metros, una fracción de espacios vacíos de 0.440 y una esfericidad de 0.949 lo cual nos indica que se tienen geometrías relativamente uniformes con tendencias a ser esféricas con un grano de tipo D donde si se tienen lechos grandes de estas partículas serán difíciles de fluidizar y su comportamiento dará como resultado la formación de burbujas grandes y explosivas.
- La velocidad mínima de fluidización se determinó matemáticamente mediante la ecuación de Ergun obteniéndose un valor de $U_{mf} = 1.286$ m/s.
- A temperaturas mayores se logra una mayor remoción del contenido de humedad, debido al incremento en la movilidad de las moléculas de agua provocado por una energía cinética mayor resultado de un incremento en la temperatura de operación.
- Las curvas de secado mostraron un periodo de velocidad decreciente, lo cual indica que el trigo tiene un comportamiento similar a los cereales más estudiados como maíz y arroz, permitiendo suponer que el contenido de humedad depende de la difusión efectiva por varios mecanismos simultáneos, que incluyen la acción capilar, la difusión del vapor a lo largo de las superficies internas y difusión a través de las paredes celulares y por lo tanto es posible modelar el proceso de secado del trigo mediante la segunda ley de Fick.
- Al incrementar la temperatura para una carga inicial fija, los coeficientes de difusividad efectiva promedio incrementan, ya que a temperaturas mayores el mecanismo de difusión se ve favorecido debido a un incremento en la energía cinética de las moléculas de agua.
- Al incrementar la carga de lecho la energía de activación disminuye, indicando que los mecanismos de difusión se ven favorecidos con una carga de lecho mayor debido a que los valores de energía de activación elevados se asocian con materiales donde el agua está fuertemente enlazada a la

estructura del material y consecuentemente su remoción se encuentra dominada por la estructura de la muestra a secar. Por medio del balance de materia se obtuvo el porcentaje de remoción de agua del trigo para temperaturas de 40, 70 y 100 °C lográndose una mayor remoción de humedad en tiempos de secado menores para cargas de lecho elevadas.

- Con el balance de energía Se puede ver que a medida que pasa el tiempo, la temperatura del sólido va incrementando hasta alcanzar la temperatura del aire que está circulando dentro del secador.
- Se modeló adecuadamente el proceso de secado en lecho fluidizado del trigo mediante la segunda ley de Fick ya que la diferencia entre los datos experimentales y los obtenidos teóricamente del contenido de humedad adimensional fue prácticamente nula.

Referencias

Referencias

1. Hosney R. Carl. 1991. Principios de ciencia y tecnología de los cereales, ACRIBIA, España, pp. 1-18 y 109-128.
2. Barbosa-Cánovas G. V. y Vega-Mercado H. 2000. Deshidratación de alimentos, 1ª edición, Acribia, España, pp. 1 - 7 y 273 - 276.
3. Caballero F. V. 2006, El método de las líneas y su aplicación en problemas de ingeniería de alimentos: secado en lechos fluidizados, Investigación Universitaria Multidisciplinaria, 5(5), 43 - 50.
4. Cabrera A. 2004. El efecto de la temperatura de operación sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando vapor sobrecalentado para diferentes tipos de partículas, Tesis: Licenciatura, UDLAP, México, Capítulo 8, pp. 3 y Capítulo 9.
5. Crack J. 1975. Mathematics of diffusion, 2ª edición, Clarendon Press: Oxford, UK.
6. Cruces C. R. 1986. Lo que México aportó al mundo, Panorama, México, pp. 136.
7. De la Fuente S., Rodríguez G., Riera E., Gallego J. A. y Mulet A. 2004. Desarrollo de un Sistema de Secado mediante Lecho Fluido Asistido por Ultrasonidos de Potencia, Acústica, 144, 1 - 8.
8. De Lima A. G. B., Nebra S. A. y De Queiroz M. R. 2001. Simultaneous heat and mass diffusion including shrinkage during drying of banana: a numerical simulation, Drying conference, 8(10), 331 - 341.
9. El-Aouar A., Azoubel P. M. y Murr F. E. X. 2003. Drying kinetic of fresh and osmotically treated papaya (Carica papaya L.), Journal Food Engineering, 59, 85 - 91.
10. Foust A.S., Maus L., Andersen L.B., Wenzel L.A. y Clump C.W. 1987. Principios de operaciones unitarias, 2ª edición, Continental, México, pp. 459 - 461.
11. García L. G. 2006. Estudio del secado por lecho fluidizado en lotes de pimienta gorda (Pimienta dioica L. Merrill), Tesis: Licenciatura, UAEM, México, pp. 44 - 45 y 51.
12. Geankoplis C. J. 2006. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, CECSA, 3ª edición, México, pp. 579 - 649.
13. Giner S. A. y Calvelo A., 1987. Modelling of Wheat Drying in Fluidized Beds. Journal of Food Science, 52 (5), 1358-1363.
14. Giraldo-Zuñiga A. D., Arevalo-Pinedo A., Rezende J. R., Silva C. S. y Monteiro J. A. 2006. Drying Kinetics For Murici (Byrsonima Crassifolia) Fruit. Journal of Food Processing and Preservation, 30, 699 - 705.
15. Giraldo-Zuñiga A. D., Arévalo-Pinedo A., Rodriguez R. M., Lima C. S. S. y Feitosa A. C. 2006. Kinetic Drying Experimental Data and Mathematical Model for Jackfruit (Artocarpus integrifolia) Slices, Ciencia y Tecnología Alimentaria, 5(2), 89 - 92.
16. Hiras K. y Takemasa M. 2002. Ciencia y Tecnología de las especias, Acribia, pp. 1 - 42.
17. Jayaraman K. S. y Das Gupta D. K. 1992. Dehydration of fruit and vegetables-recent developments in principles and techniques, Drying Technology, 10(1), 50-61.
18. Kechaou N. y Maâlej M. 2000. A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves, Drying technology, 18(4 y 5), 1109 - 1125.
19. Keey R. B. 1978. Introduction to Industrial Drying Operations, Pergamon Press, Inglaterra, pp. 1 - 13 y 147 - 187.

20. Kundu, K. M., Das, R., Datta, A. B. y Chatterjee, P. K. 2005. On analysis of drying process. *Drying technology*, 23(2), 1093–1105.
21. Kunii D. y Levenspiel O. 1991. Fluidization Engineering, 2a edición, Butterworth-Heinemann, EUA, pp. 61 - 94.
22. McCabe W. L., Smith J. C. y Harriott P. 2002. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 6ª edición, Mc Graw Hill, México, pp. 836 - 872.
23. Mohsenin N. N. 1980. Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials, G and B Science Publisher, Londres, pp. 37 - 61.
24. Norman W. D. 1990. Conservación de los alimentos, 18ª edición, Continental, pp. 157 - 196.
25. Patiño J. L. 2004. Estudio experimental de las hidrodinámicas de un lecho fluidizado al vacío empleando vapor sobrecalentado, Tesis: Licenciatura, UDLAP, México, pp. 122 - 130.
26. Pérez-Alonso, C., Cruz-Olivares, J., Ramírez, A., Román-Guerrero, A., & Vernon-Carter, E. J. (2011). Moisture diffusion in allspice (*Pimenta dioica* L. Merril) fruits during fluidized bed drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(3), 308-312.
27. Rahman M. D. y Lamb J. 1991. Air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated pineapple, *Journal Food Process Engineering*, 14, 163 - 171.
28. Reay D. 1986. Fluid Bed Drying, John Wiley and Sons, Inglaterra, pp. 259 - 282.
29. Singh R. P. y Heldman D. R. 1998. Introducción a la Ingeniería de los Alimentos, 1ª edición, Acribia, España, pp. 455 - 468.
30. Smith J. M., Van Ness H. C. y Abbott M. M. 2003. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química, 6ª edición, McGraw Hill, México, pp. 738 - 739.
31. Srinivasa Kannan C, Thomas P. P. y Varma Y. B. G. 1995. Drying of Solids in Fluidized Beds, *Industrial Engineering Chemical Research*, 34, 3068 - 3077.
32. Torrez I., 2013. Diseño de un proceso térmico de fluidización para la producción de soja crocante. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Nacional de La Plata. Pp.85-99.
33. Treybal R. E. 2005. Operaciones de Transferencia de Masa, 2ª edición, Mc Graw Hill, pp. 723 - 791.
34. Welty J.R., Wicks C.E. y Wilson R.E. 2005. Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa, 2ª edición, Limusa Wiley, México, pp. 882 y 888.
35. Wolfgang M. W. K. 1987. Estudio comparativo de las pajas de trigo, sorgo y amaranto, Tesis: Licenciatura, ITESM, México, pp. 53.
36. Yamamoto S. y Sano Y. 1994. Drying of Carbohydrate and Protein Solutions, *Drying technology*, 12(5), 1069 - 1080.
37. Zahed A. H., Zhu J.X. y Grace J. R., 1995. Modelling and Simulation of Batch and Continuous Fluidized Bed Dryers. *Drying Technology*, 13 (1&2), 1-28.
38. Zogzas N. P., Maroulis Z. B., Marinou-Kouris D. 1994. Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225 - 2253.
39. Senadeera W., Bhandari B. R., Young G. y Wijesinghe B. 2005. Modeling Dimensional Shrinkage of Shaped Foods in Fluidized Bed Drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 29, 109 - 119.
40. Simal S., Garau M. C., Femenia A. y Roselló C. 2006. A Difussional Model with a Moisture-Dependent, *Drying Technology*, 24:1365 - 1372.
41. Singh R. P. y Heldman D. R. 1998. Introducción a la Ingeniería de los Alimentos, 1ª edición, Acribia, España, pp. 455 - 468.

Anexos

Anexo A
Datos experimentales del contenido de humedad

Tabla A.1 Datos experimentales del contenido de humedad ($kg H_2O/kg s.s.$) del trigo al interior del lecho fluidizado con una carga inicial de $0.8 kg$ a diversas temperaturas.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperatura del aire (°C)</i>		
	<i>40</i>	<i>70</i>	<i>100</i>
0	0.264	0.263	0.293
2	0.192	0.207	0.237
4	0.185	0.195	0.22
6	0.179	0.185	0.207
8	0.174	0.177	0.196
10	0.17	0.17	0.187
15	0.163	0.158	0.17
20	0.159	0.149	0.156
30	0.154	0.138	0.137
40	0.15	0.13	0.123
60	0.145	0.121	0.107
80	0.141	0.111	0.095
100	0.138	0.105	0.084
120	0.135	0.101	0.073
140	0.132	0.098	0.066
160	0.127	0.092	0.06
180	0.119	0.082	0.054

Tabla A.2 Datos experimentales del contenido de humedad ($kg H_2O/kg s.s.$) del trigo al interior del lecho fluidizado con una carga inicial de $1.0 kg$ a diversas temperaturas.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperatura del aire (°C)</i>		
	<i>40</i>	<i>70</i>	<i>100</i>
0	0.277	0.277	0.253
2	0.235	0.188	0.163
4	0.224	0.175	0.142
6	0.216	0.165	0.129
8	0.209	0.157	0.12
10	0.203	0.151	0.113
15	0.192	0.14	0.104
20	0.183	0.132	0.098
30	0.171	0.124	0.092
40	0.163	0.119	0.089
60	0.154	0.114	0.083
80	0.149	0.109	0.079
100	0.145	0.105	0.075

120	0.139	0.099	0.069
140	0.135	0.096	0.065
160	0.13	0.09	0.057
180	0.125	0.087	0.053

Tabla A. Datos experimentales del contenido de humedad ($kg H_2O/kg s.s.$) del trigo al interior del lecho fluidizado con una carga inicial de 1.2 kg a diversas temperaturas.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperatura del aire (°C)</i>		
	<i>40</i>	<i>70</i>	<i>100</i>
0	0.267	0.295	0.268
2	0.23	0.255	0.208
4	0.216	0.235	0.175
6	0.206	0.219	0.155
8	0.198	0.206	0.142
10	0.191	0.195	0.132
15	0.18	0.176	0.119
20	0.172	0.161	0.11
30	0.163	0.146	0.099
40	0.158	0.137	0.092
60	0.152	0.126	0.086
80	0.146	0.118	0.079
100	0.141	0.112	0.073
120	0.135	0.103	0.066
140	0.131	0.101	0.061
160	0.124	0.094	0.054
180	0.119	0.088	0.05

Anexo B

Elaboración de las curvas de rapidez de secado

Tabla B.1 Datos para la obtención de las curvas de secado de trigo con una carga de 0.8 kg a diversas temperaturas.

<i>40°C</i>		<i>70°C</i>		<i>100 °C</i>	
<i>X</i>	<i>dX/dt</i>	<i>X</i>	<i>dX/dt</i>	<i>X</i>	<i>dX/dt</i>
0.0720	0.0360	0.2070	0.0280	0.2370	0.0280
0.0070	0.0035	0.1950	0.0060	0.2200	0.0085
0.0060	0.0030	0.1850	0.0050	0.2070	0.0065
0.0050	0.0025	0.1770	0.0040	0.1960	0.0055
0.0040	0.0020	0.1700	0.0035	0.1870	0.0045
0.0070	0.0014	0.1580	0.0024	0.1700	0.0034
0.0040	0.0008	0.1490	0.0018	0.1560	0.0028

0.0050	0.0005	0.1380	0.0011	0.1370	0.0019
0.0040	0.0004	0.1300	0.0008	0.1230	0.0014
0.0050	0.0003	0.1210	0.0005	0.1070	0.0008
0.0040	0.0002	0.1110	0.0005	0.0950	0.0006
0.0030	0.0001	0.1050	0.0003	0.0840	0.0006
0.0030	0.0002	0.1010	0.0002	0.0730	0.0006
0.0030	0.0002	0.0980	0.0002	0.0660	0.0004
0.0050	0.0003	0.0920	0.0003	0.0600	0.0003
0.0080	0.0004	0.0820	0.0005	0.0540	0.0003

Tabla B.2 Datos para la obtención de las curvas de secado de trigo con una carga de 1.0 kg a diversas temperaturas.

40°C		70°C		100 °C	
<i>X</i>	<i>dX/dt</i>	<i>X</i>	<i>dX/dt</i>	<i>X</i>	<i>dX/dt</i>
0.2350	0.0210	0.1880	0.0445	0.2530	0.0450
0.2240	0.0055	0.1750	0.0065	0.1630	0.0105
0.2160	0.0040	0.1650	0.0050	0.1420	0.0065
0.2090	0.0035	0.1570	0.0040	0.1290	0.0045
0.2030	0.0030	0.1510	0.0030	0.1200	0.0035
0.1920	0.0022	0.1400	0.0022	0.1130	0.0018
0.1830	0.0018	0.1320	0.0016	0.1040	0.0012
0.1710	0.0012	0.1240	0.0008	0.0980	0.0006
0.1630	0.0008	0.1190	0.0005	0.0920	0.0003
0.1540	0.0005	0.1140	0.0003	0.0890	0.0003
0.1490	0.0003	0.1090	0.0003	0.0830	0.0002
0.1450	0.0002	0.1050	0.0002	0.0790	0.0002
0.1390	0.0003	0.0990	0.0003	0.0750	0.0003
0.1350	0.0002	0.0960	0.0002	0.0690	0.0002
0.1300	0.0003	0.0900	0.0003	0.0650	0.0004
0.1250	0.0003	0.0870	0.0002	0.0570	0.0002

Tabla B.3 Datos para la obtención de las curvas de secado de trigo con una carga de 1.2 kg a diversas temperaturas.

40°C		70°C		100 °C	
<i>X</i>	<i>dX/dt</i>	<i>X</i>	<i>dX/dt</i>	<i>X</i>	<i>dX/dt</i>
0.2300	0.0185	0.2550	0.0200	0.2080	0.0300
0.2160	0.0070	0.2350	0.0100	0.1750	0.0165
0.2060	0.0050	0.2190	0.0080	0.1550	0.0100
0.1980	0.0040	0.2060	0.0065	0.1420	0.0065
0.1910	0.0035	0.1950	0.0055	0.1320	0.0050

0.1800	0.0022	0.1760	0.0038	0.1190	0.0026
0.1720	0.0016	0.1610	0.0030	0.1100	0.0018
0.1630	0.0009	0.1460	0.0015	0.0990	0.0011
0.1580	0.0005	0.1370	0.0009	0.0920	0.0007
0.1520	0.0003	0.1260	0.0006	0.0860	0.0003
0.1460	0.0003	0.1180	0.0004	0.0790	0.0004
0.1410	0.0003	0.1120	0.0003	0.0730	0.0003
0.1350	0.0003	0.1030	0.0005	0.0660	0.0004
0.1310	0.0002	0.1010	0.0001	0.0610	0.0003
0.1240	0.0004	0.0940	0.0004	0.0540	0.0004
0.1190	0.0003	0.0880	0.0003	0.0500	0.0002

Anexo C

Código en MATLAB para la estimación de los coeficientes de difusión efectiva

```

clc;clear;
disp('_____')
disp('Cálculo de la Difusión Efectiva de acuerdo con la segunda ley de Fick')
disp('      Empleado el método de Newton-Raphson')
disp('_____')

info=input('tiempo (minutos), X(Kg H2O/Kg s.s.);');
[n_datos,n_datosb] = size(info);
t_seg=60*info(:,1);
R_X=input('Radio (m)= ');
M_real=info(:,2);

for paso=2:n_datos
    t=t_seg(paso);
    R=0.0035;
    M=M_real(paso);
    D_eff=1e-11; % Valor supuesto inicial
    func=0.01; % Método de Newton
    while abs(func)>=1E-10
        D_ef=D_eff;
        for n=1:500 % Numero de terminos de la sumatoria
            termino(n)=(exp(-((n*pi)^2)*D_ef*t/R^2))/(n^2);
            % calculo de la derivada de la funcion
            termino_der(n)=exp(-((n*pi)^2)*D_ef*t/R^2);
        end
        H_teo=(6/pi^2)*(sum(termino));
        derivada=(-6*t/R^2)*(sum(termino_der));
        func=H_teo-M;
    end
end

```

```

Def_new=D_ef-func/derivada;
D_eff=Def_new;
end
D_efectiva(paso-1)=D_eff;
M_teorica(paso-1)=H_teo;
Funcionn(paso-1)=func;
clear termino, clear terminoder, clear funcion
end
    
```

Anexo D

Estimación del coeficiente de difusividad efectiva

Tabla D.1 Datos de difusividad efectiva para el trigo con una carga de lecho de 0.8 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire (°C)		
	40	70	100
2	1.15E-08	1.15E-08	1.209E-08
4	6.19E-09	6.19E-09	9.316E-09
6	4.24E-09	4.24E-09	7.473E-09
8	3.25E-09	3.25E-09	6.548E-09
10	2.65E-09	2.65E-09	4.454E-09
15	1.82E-09	1.82E-09	3.765E-09
20	9.50E-10	9.50E-10	3.411E-09
30	7.26E-10	7.26E-10	2.929E-09
40	4.95E-10	4.95E-10	8.274E-10
60	3.79E-10	3.79E-10	5.994E-10
80	3.07E-10	3.07E-10	4.802E-10
100	2.60E-10	2.60E-10	4.096E-10
120	2.26E-10	2.26E-10	3.655E-10
140	2.03E-10	2.03E-10	3.281E-10
160	1.76E-10	1.76E-10	2.994E-10
180	1.01E-10	1.01E-10	2.783E-10
Promedio	2.09E-09	2.09E-09	3.35E-09

Tabla D.2 Datos de difusividad efectiva para el trigo con una carga de lecho de 1.0 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire (°C)		
	40	70	100
2	9.97E-09	1.22E-08	1.37E-08
4	5.23E-09	6.47E-09	7.54E-09
6	3.60E-09	4.51E-09	5.35E-09
8	2.79E-09	3.51E-09	4.20E-09
10	2.29E-09	2.89E-09	3.48E-09

15	1.60E-09	2.03E-09	2.44E-09
20	1.25E-09	1.58E-09	1.89E-09
30	8.78E-10	1.10E-09	1.30E-09
40	6.83E-10	8.44E-10	9.94E-10
60	4.75E-10	5.78E-10	6.87E-10
80	3.65E-10	4.45E-10	5.28E-10
100	2.97E-10	3.64E-10	4.33E-10
120	2.55E-10	3.13E-10	3.75E-10
140	2.23E-10	2.73E-10	3.30E-10
160	2.00E-10	2.47E-10	3.06E-10
180	1.82E-10	2.24E-10	2.80E-10
Promedio	1.89E-09	2.35E-09	2.7375E-09

Tabla D.3 Datos de difusividad efectiva para el trigo con una carga de lecho de 1.2 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire (°C)		
	40	70	100
2	1.02E-08	1.04E-08	1.15E-08
4	5.41E-09	5.99E-09	6.45E-09
6	3.76E-09	4.59E-09	4.23E-09
8	2.92E-09	2.98E-09	3.77E-09
10	2.41E-09	2.37E-09	3.16E-09
15	1.69E-09	2.17E-09	2.25E-09
20	1.31E-09	1.79E-09	1.77E-09
30	9.11E-10	1.05E-09	1.25E-09
40	6.99E-10	9.72E-10	9.77E-10
60	4.79E-10	7.43E-10	6.75E-10
80	3.70E-10	5.24E-10	5.28E-10
100	3.03E-10	4.50E-10	4.39E-10
120	2.60E-10	3.56E-10	3.83E-10
140	2.27E-10	2.95E-10	3.40E-10
160	2.06E-10	2.61E-10	3.13E-10
180	1.88E-10	2.42E-10	2.87E-10
Promedio	1.96E-09	2.19E-09	2.40E-09

Anexo E

Comparación de contenidos de humedad (M) experimentales y teóricos

Tabla E.1 Datos del contenido de humedad M (adimensional) experimental para una carga de lecho de 0.8 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire (°C)		
	40	70	100

0	0.264	0.263	0.293
2	0.192	0.2070	0.2370
4	0.185	0.1950	0.2200
6	0.179	0.1850	0.2070
8	0.174	0.1770	0.1960
10	0.17	0.1700	0.1870
15	0.163	0.1580	0.1700
20	0.159	0.1490	0.1560
30	0.154	0.1380	0.1370
40	0.15	0.1300	0.1230
60	0.145	0.1210	0.1070
80	0.141	0.1110	0.0950
100	0.138	0.1050	0.0840
120	0.135	0.1010	0.0730
140	0.132	0.0980	0.0660
160	0.127	0.0920	0.0600
180	0.119	0.0820	0.0540

Tabla E.2 Datos del contenido de humedad M (adimensional) experimental para una carga de lecho de 1.0 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)		
	40	70	100
0	0.264	0.277	0.2530
2	0.192	0.1880	0.1630
4	0.185	0.1750	0.1420
6	0.179	0.1650	0.1290
8	0.174	0.1570	0.1200
10	0.17	0.1510	0.1130
15	0.163	0.1400	0.1040
20	0.159	0.1320	0.0980
30	0.154	0.1240	0.0920
40	0.15	0.1190	0.0890
60	0.145	0.1140	0.0830
80	0.141	0.1090	0.0790
100	0.138	0.1050	0.0750
120	0.135	0.0990	0.0690
140	0.132	0.0960	0.0650
160	0.127	0.0900	0.0570
180	0.119	0.0870	0.0530

Tabla E.3 Datos del contenido de humedad M (adimensional) experimental para una carga de lecho de 1.2 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire (°C)		
	40	70	100
0	0.2670	0.295	0.268
2	0.2300	0.2550	0.2080
4	0.2160	0.2350	0.1750
6	0.2060	0.2190	0.1550
8	0.1980	0.2060	0.1420
10	0.1910	0.1950	0.1320
15	0.1800	0.1760	0.1190
20	0.1720	0.1610	0.1100
30	0.1630	0.1460	0.0990
40	0.1580	0.1370	0.0920
60	0.1520	0.1260	0.0860
80	0.1460	0.1180	0.0790
100	0.1410	0.1120	0.0730
120	0.1350	0.1030	0.0660
140	0.1310	0.1010	0.0610
160	0.1240	0.0940	0.0540
180	0.1190	0.0880	0.0500

Tabla E.4 Datos del contenido de humedad M (adimensional) teórico para una carga de lecho de 0.8 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire (°C)		
	40	70	100
2	0.192	0.2070	0.2370
4	0.185	0.1950	0.2200
6	0.179	0.1850	0.2070
8	0.174	0.1770	0.1960
10	0.17	0.1700	0.1870
15	0.163	0.1580	0.1700
20	0.159	0.1490	0.1560
30	0.154	0.1380	0.1370
40	0.15	0.1300	0.1230
60	0.145	0.1210	0.1070
80	0.141	0.1110	0.0950
100	0.138	0.1050	0.0840
120	0.135	0.1010	0.0730
140	0.132	0.0980	0.0660
160	0.127	0.0920	0.0600
180	0.119	0.0820	0.0540

Tabla E.5 Datos del contenido de humedad M (adimensional) teórico para una carga de lecho de 1.0 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire (°C)		
	40	70	100
2	0.192	0.1880	0.1630
4	0.185	0.1750	0.1420
6	0.179	0.1650	0.1290
8	0.174	0.1570	0.1200
10	0.17	0.1510	0.1130
15	0.163	0.1400	0.1040
20	0.159	0.1320	0.0980
30	0.154	0.1240	0.0920
40	0.15	0.1190	0.0890
60	0.145	0.1140	0.0830
80	0.141	0.1090	0.0790
100	0.138	0.1050	0.0750
120	0.135	0.0990	0.0690
140	0.132	0.0960	0.0650
160	0.127	0.0900	0.0570
180	0.119	0.0870	0.0530

Tabla E.6 Datos del contenido de humedad M (adimensional) teórico para una carga de lecho de 1.2 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire (°C)		
	40	70	100
2	0.2300	0.2550	0.2080
4	0.2160	0.2350	0.1750
6	0.2060	0.2190	0.1550
8	0.1980	0.2060	0.1420
10	0.1910	0.1950	0.1320
15	0.1800	0.1760	0.1190
20	0.1720	0.1610	0.1100
30	0.1630	0.1460	0.0990
40	0.1580	0.1370	0.0920
60	0.1520	0.1260	0.0860
80	0.1460	0.1180	0.0790
100	0.1410	0.1120	0.0730
120	0.1350	0.1030	0.0660
140	0.1310	0.1010	0.0610

160	0.1240	0.0940	0.0540
180	0.1190	0.0880	0.0500

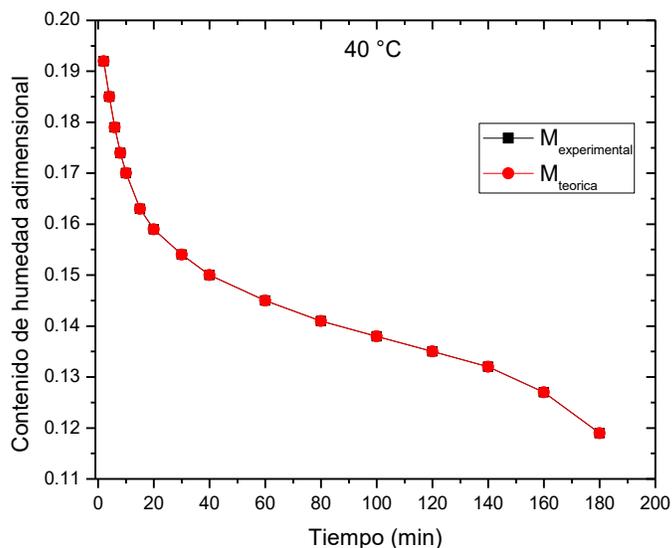


Figura E.1 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 0.8 kg a 40 °C.

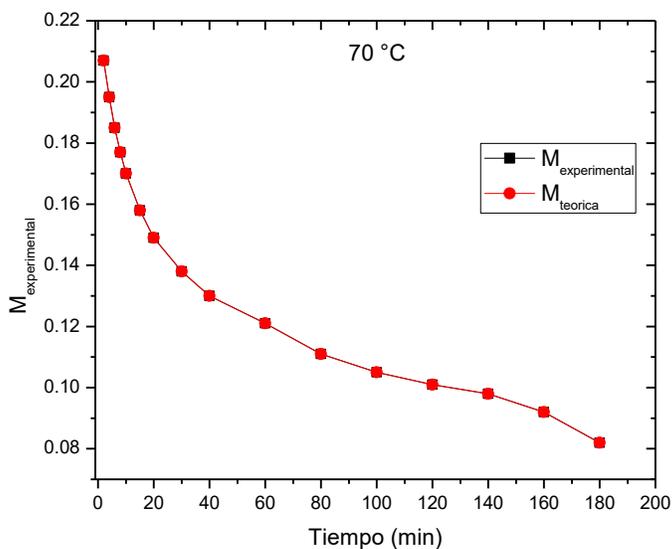


Figura E.2 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 0.8 kg a 70 °C.

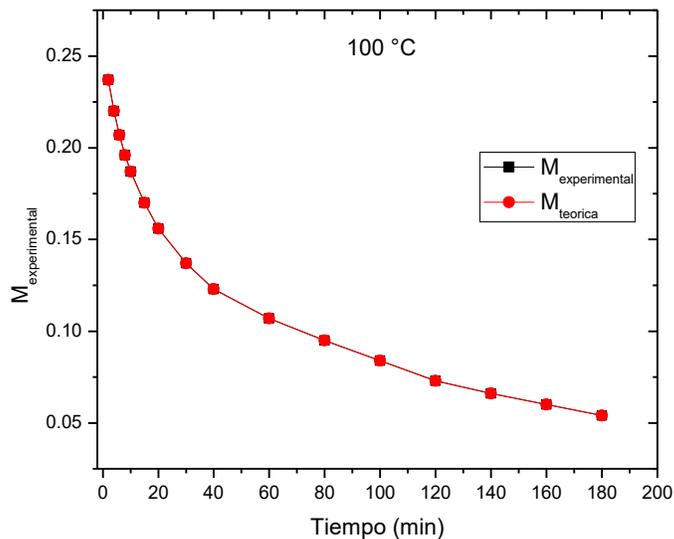


Figura E.3 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 0.8 kg a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

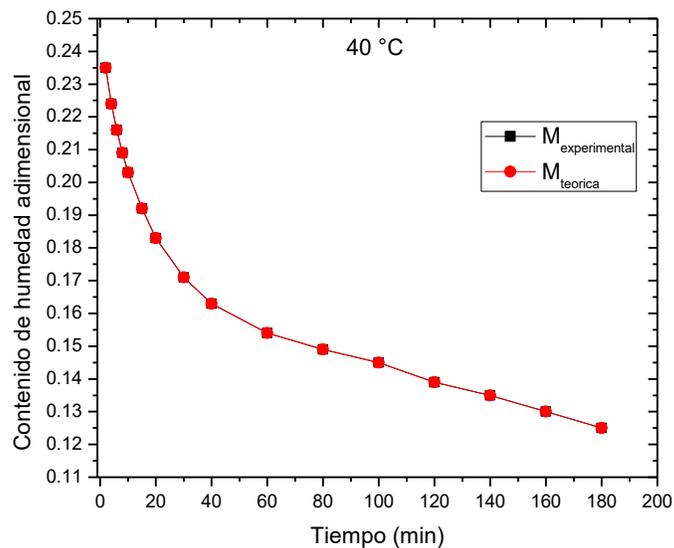


Figura E.4 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 1.0 kg a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

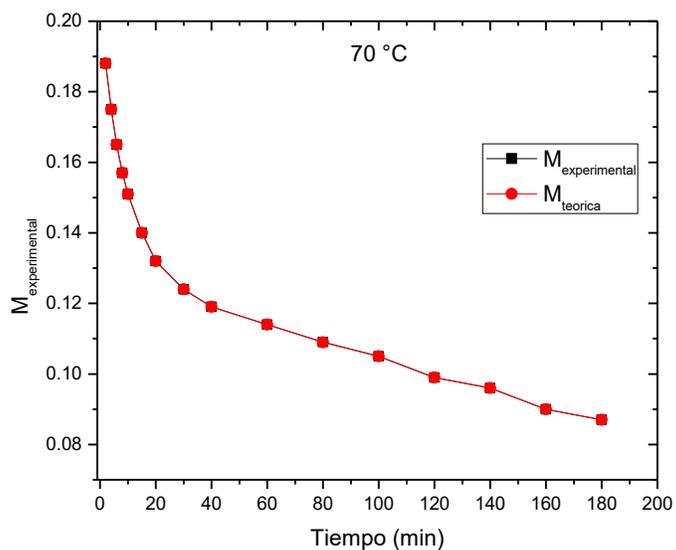


Figura E.5 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 1.0 kg a 70 °C.

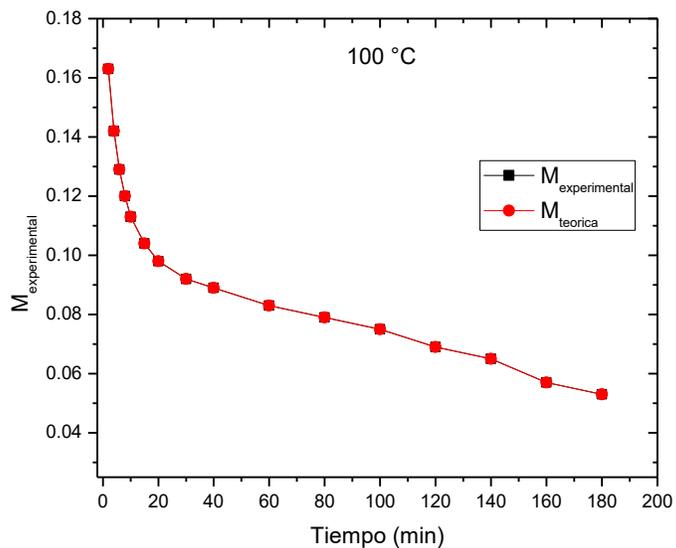


Figura E.6 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 1.0 kg a 100 °C.

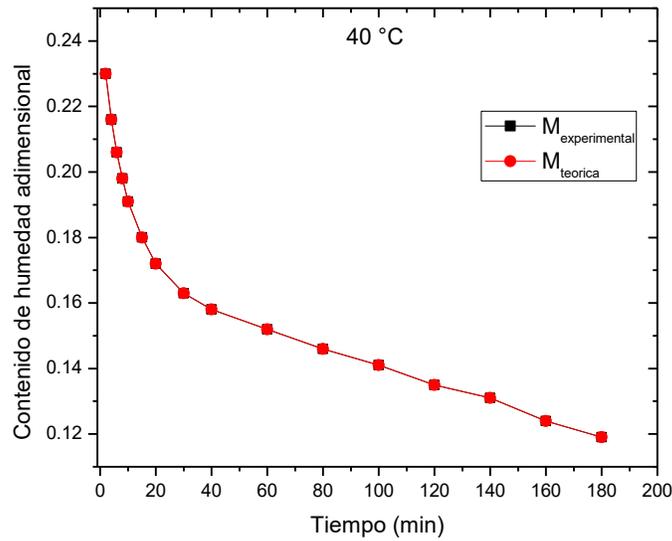


Figura E.7 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 1.2 kg a 40 °C.

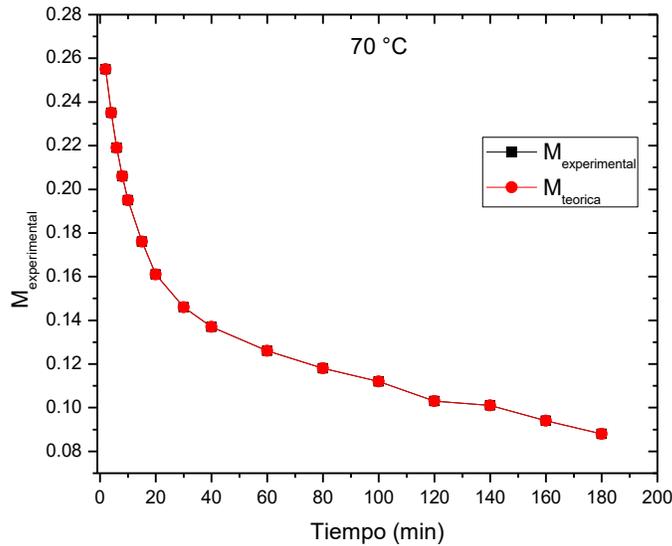


Figura E.8 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 1.2 kg a 70 °C.

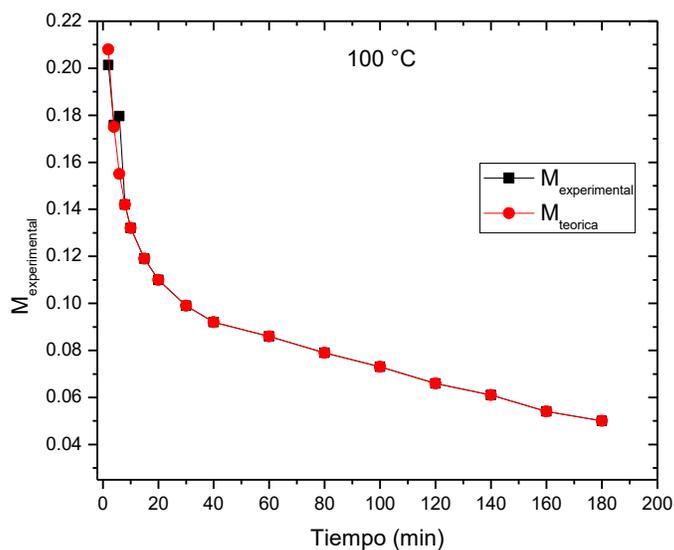


Figura E.9 Comparación entre el contenido de humedad experimental y teórico para una carga inicial de 1.2 kg a 100 °C.

Anexo F

Estimación de la energía de activación empleando un método grafico

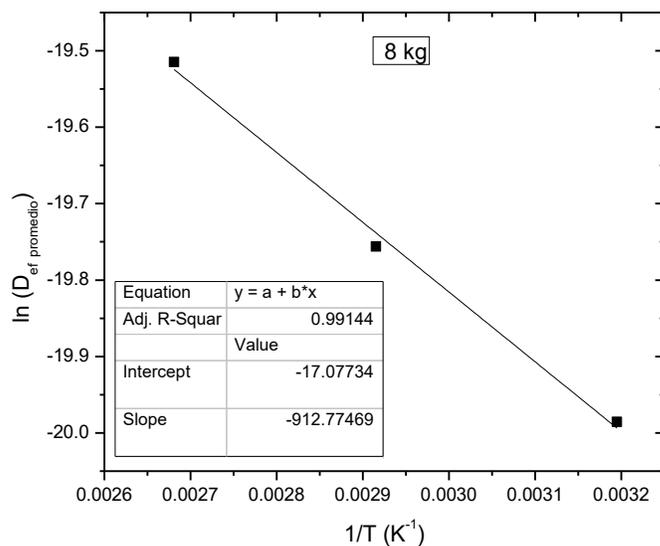


Figura F.1 Regresión lineal de los datos de $\ln \overline{D_{\text{eff}}}$ y $1/T$ para una carga de 0.8 kg.

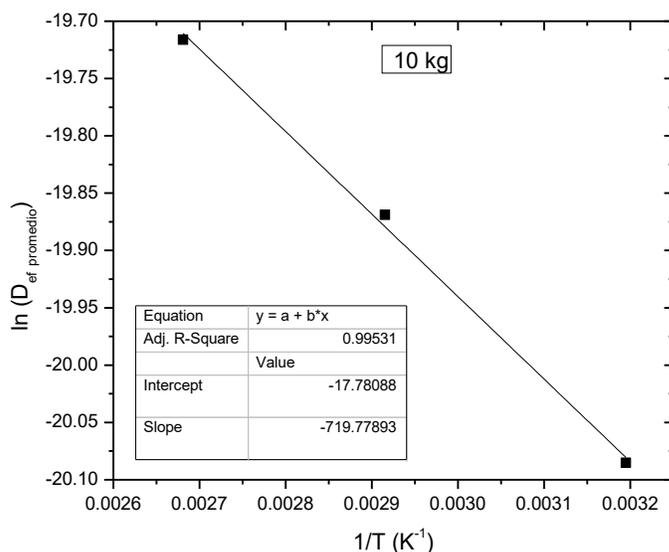


Figura F.2 Regresión lineal de los datos de $\ln \overline{D_{eff}}$ y $1/T$ para una carga de 1.0 kg.

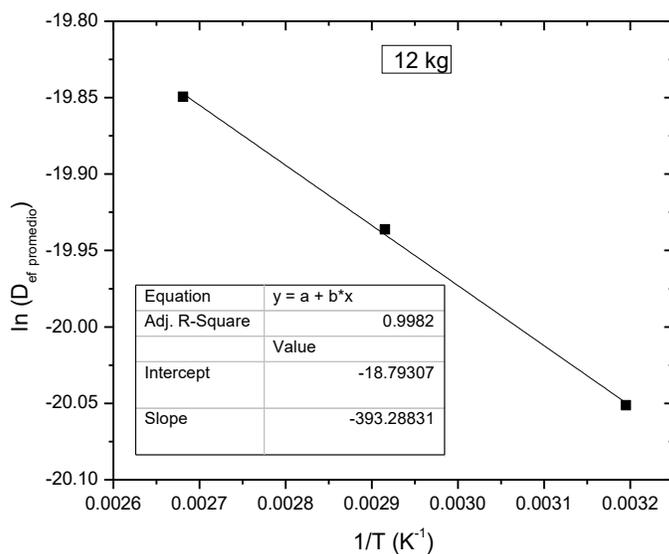


Figura F.3 Regresión lineal de los datos de $\ln \overline{D_{eff}}$ y $1/T$ para una carga de 1.2 kg.

Anexo G

Datos experimentales de la capacidad calorífica del sólido

Tabla G.1 Datos experimentales de capacidad calorífica del sólido determinados con el calorímetro DSC (2010).

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Cp (kJ/kg °C)</i>
	<i>X = 0.12 kgH₂O/ kg s.s.</i>
20	1.116
25	1.120
30	1.121
35	1.126
40	1.132
45	1.141
50	1.149
55	1.157
60	1.167
65	1.187
70	1.202
75	1.216
80	1.227
85	1.240
90	1.260
95	1.276
100	1.293

Anexo H Evaluación del contenido de humedad final del aire

Tabla H.1 Evaluación del contenido de humedad final del aire Y_f (kg H₂O/kg a.s.) para una carga de lecho de 0.8 kg a diversas temperaturas.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperatura del aire (°C)</i>		
	<i>40</i>	<i>70</i>	<i>100</i>
2	0.622	0.484	0.484
4	0.061	0.104	0.147
6	0.052	0.086	0.112
8	0.043	0.069	0.095
10	0.035	0.061	0.078
15	0.024	0.042	0.059
20	0.014	0.031	0.048
30	0.009	0.019	0.033
40	0.007	0.014	0.024
60	0.004	0.008	0.014
80	0.004	0.009	0.010

100	0.003	0.005	0.010
120	0.003	0.004	0.010
140	0.003	0.003	0.006
160	0.004	0.005	0.005
180	0.007	0.009	0.005
% de H ₂ O removida	98.87%	98.19%	98.91%

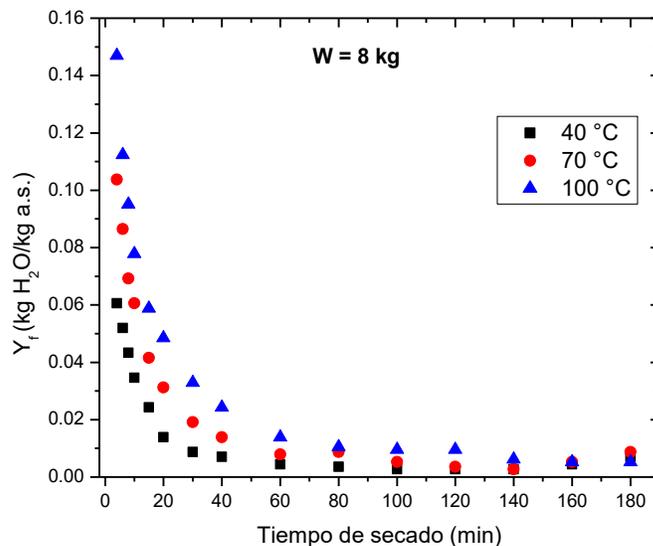


Figura H.1 Contenido de H₂O en el aire a la salida del secador para una carga de 0.8 kg.

Tabla H.2 Evaluación del contenido de humedad final del aire Y_f (kg H₂O/kg a.s.) para una carga de lecho de 1.0 kg a diversas temperaturas.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperatura del aire (°C)</i>		
	<i>40</i>	<i>70</i>	<i>100</i>
2	0.454	0.961	0.972
4	0.119	0.140	0.227
6	0.086	0.108	0.140
8	0.076	0.086	0.097
10	0.065	0.065	0.076
15	0.048	0.048	0.039
20	0.039	0.035	0.026
30	0.026	0.017	0.013
40	0.017	0.011	0.007
60	0.010	0.005	0.007
80	0.005	0.005	0.004
100	0.004	0.004	0.004
120	0.007	0.007	0.007

140	0.004	0.003	0.004
160	0.005	0.007	0.009
180	0.005	0.003	0.004
% de H ₂ O removida	98.79%	99.65%	99.55%

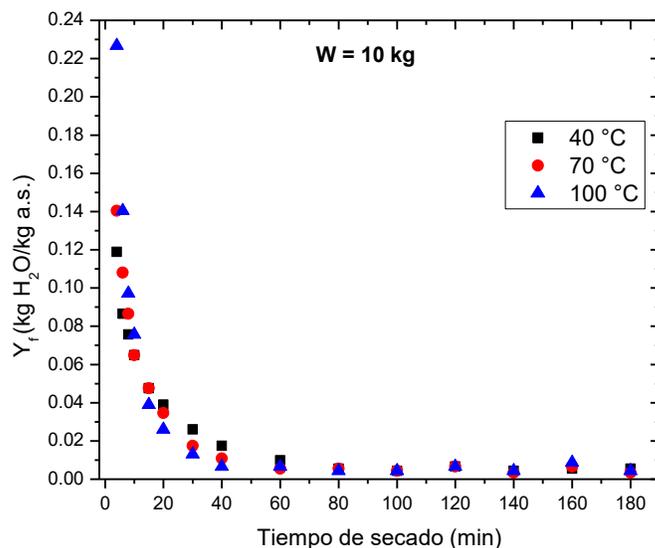


Figura H.2 Contenido de H₂O en el aire a la salida del secador para una carga de 1.0 kg.

Tabla H.3 Evaluación del contenido de humedad final del aire Y_f (kg H₂O/kg a.s.) para una carga de lecho de 1.2 kg a diversas temperaturas.

Tiempo (min)	Temperatura del aire (°C)		
	40	70	100
2	0.479	0.518	0.777
4	0.181	0.259	0.428
6	0.130	0.207	0.259
8	0.104	0.169	0.169
10	0.091	0.143	0.130
15	0.057	0.099	0.067
20	0.042	0.078	0.047
30	0.023	0.039	0.029
40	0.013	0.023	0.018
60	0.008	0.014	0.008
80	0.008	0.010	0.009
100	0.007	0.008	0.008
120	0.008	0.012	0.009
140	0.005	0.003	0.007
160	0.009	0.009	0.009

180	0.007	0.008	0.005
% de H ₂ O removida	98.63%	98.48%	99.32%

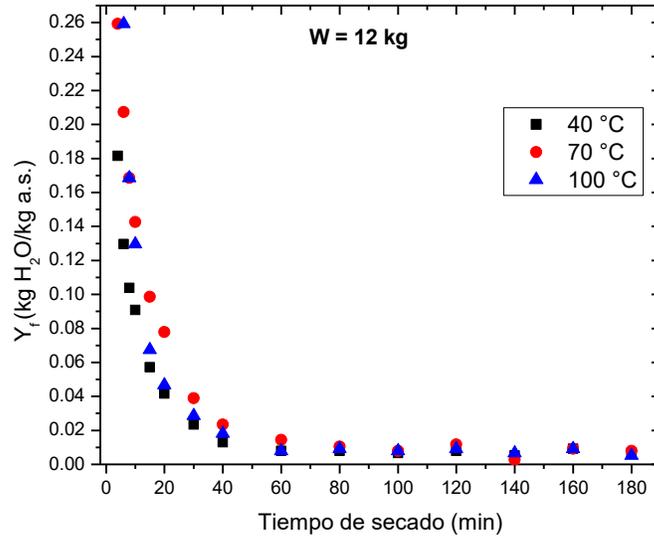


Figura H.3 Contenido de H₂O en el aire a la salida del secador para una carga de 1.2 kg.

Anexo I

Ecuaciones de ajuste para el balance de materia

Tabla I.1 Ecuaciones de ajuste para los datos del balance de materia para una carga de 0.8 kg.

T (°C)	Ecuación de ajuste	r ²
40	$Yf = 0.3669t^{-0.99}$	0.879
70	$Yf = 0.563t^{-0.979}$	0.941
100	$Yf = 0.7167t^{-0.944}$	0.989

Tabla I.2 Ecuaciones de ajuste para los datos del balance de materia para una carga de 1.0 kg.

T (°C)	Ecuación de ajuste	r ²
40	$Yf = 0.6173t^{-0.98}$	0.969
70	$Yf = 0.9493t^{-1.124}$	0.950
100	$Yf = 1.0159t^{-1.134}$	0.920

Tabla I.3 Ecuaciones de ajuste para los datos del balance de materia para una carga de 1.2 kg.

<i>T</i> (°C)	<i>Ecuación de ajuste</i>	<i>r</i> ²
40	$Yf = 0.7634t^{-0.988}$	0.962
70	$Yf = 1.3707t^{-1.067}$	0.951
100	$Yf = 1.6507t^{-1.139}$	0.970

Anexo J Estimación teórica de la temperatura del sólido

Tabla J.1 Estimación teórica de la temperatura del sólido (*T*_{S2}) para una carga de 0.8 kg.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperatura del aire T_{S2} (K)</i>		
	<i>40 °C</i>	<i>70 °C</i>	<i>100 °C</i>
0	313.26	343.66	374.06
2	354.80	376.53	407.62
4	317.28	350.66	384.18
6	316.70	349.46	381.75
8	316.12	348.28	380.53
10	315.54	347.68	379.33
15	314.85	346.39	377.99
20	314.16	345.68	377.25
30	313.82	344.87	376.17
40	313.70	344.52	375.56
60	313.53	344.11	374.85
80	313.47	344.16	374.60
100	313.42	343.93	374.52
120	313.42	343.82	374.48
140	313.41	343.76	374.25
160	313.52	343.91	374.17
180	313.68	344.11	374.15
<i>Diferencia respecto a la temperatura de operación</i>	1.05%	1.17%	1.39%

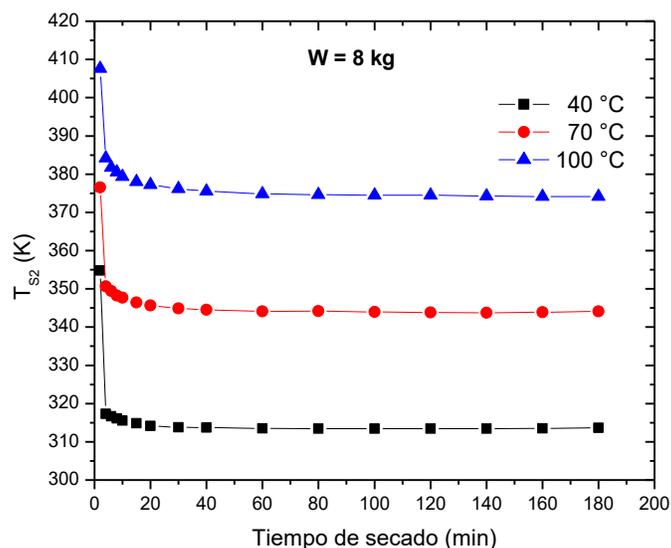


Figura J.1 Temperatura del sólido a la salida del secador para una carga de 0.8 kg.

Tabla J.2 Estimación teórica de la temperatura del sólido (T_{S2}) para una carga de 1.0 kg.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperatura del aire T_{S2} (K)</i>		
	<i>40 °C</i>	<i>70 °C</i>	<i>100 °C</i>
0	313.21	343.53	373.84
2	337.80	395.37	426.20
4	319.63	351.04	385.86
6	317.86	349.27	381.18
8	317.27	348.09	378.85
10	316.68	346.93	377.69
15	315.74	345.99	375.76
20	315.27	345.30	375.08
30	314.57	344.39	374.41
40	314.11	344.05	374.08
60	313.71	343.76	374.06
80	313.48	343.76	373.95
100	313.43	343.70	373.94
120	313.54	343.80	374.03
140	313.42	343.64	373.91
160	313.48	343.79	374.09
180	313.47	343.63	373.87
<i>Diferencia respecto a la temperatura de operación</i>	0.96%	1.36%	1.42%

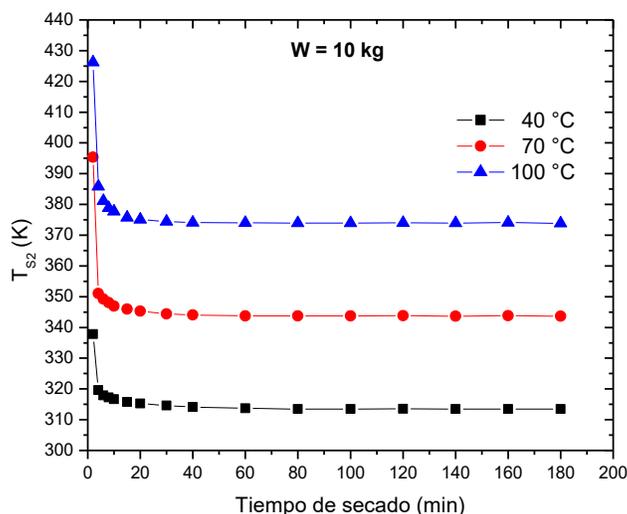


Figura J.3 Temperatura del sólido a la salida del secador para una carga de 1.0 kg.

Tabla J.3 Estimación teórica de la temperatura del sólido (T_{S2}) para una carga de 1.2 kg.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperatura del aire T_{S2} (K)</i>		
	<i>40 °C</i>	<i>70 °C</i>	<i>100 °C</i>
0	313.18	343.44	373.70
2	334.81	367.26	409.34
4	321.32	355.28	393.01
6	318.97	352.87	385.26
8	317.80	351.06	381.13
10	317.21	349.86	379.36
15	315.70	347.83	376.58
20	315.00	346.87	375.65
30	314.19	345.13	374.84
40	313.74	344.43	374.39
60	313.51	344.03	373.95
80	313.50	343.85	373.98
100	313.45	343.74	373.92
120	313.50	343.89	373.95
140	313.39	343.51	373.84
160	313.55	343.77	373.91
180	313.44	343.71	373.75
<i>Diferencia respecto a la temperatura de operación</i>	0.95%	1.27%	1.45%

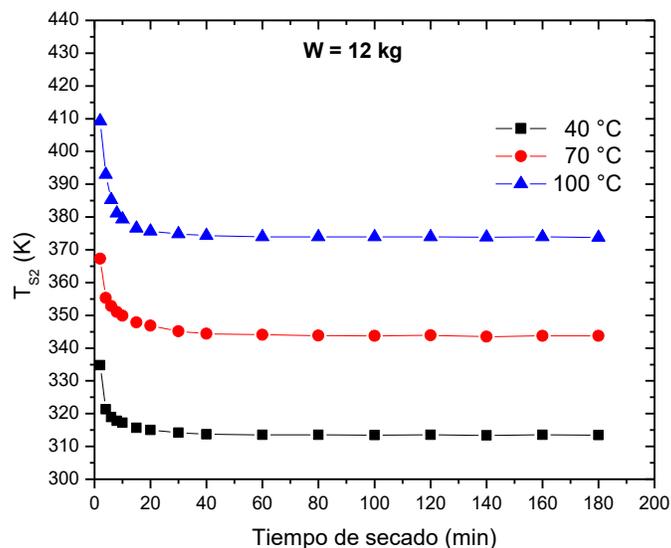


Figura J.3 Temperatura del sólido a la salida del secador para una carga de 1.2 kg.

Anexo K

Ecuaciones de ajuste para datos usados en la simulación

Tabla K.1 Ecuaciones de ajuste para los datos del balance de energía para una carga de 0.8 kg.

<i>T</i> (°C)	<i>Ecuación de ajuste</i>	<i>r</i> ²
40	$T_{s2} = 1E-11t^6 - 6E-09t^5 + 2E-06t^4 - 0.0002t^3 + 0.012t^2 - 0.3835t + 318.42$	0.994
70	$T_{s2} = 8E-12t^6 - 5E-09t^5 + 1E-06t^4 - 0.0002t^3 + 0.0133t^2 - 0.4814t + 351.31$	0.998
100	$T_{s2} = 1E-11t^6 - 8E-09t^5 + 2E-06t^4 - 0.0002t^3 + 0.0165t^2 - 0.5833t + 383.98$	0.995

Tabla K.2 Ecuaciones de ajuste para los datos del balance de energía para una carga de .10 kg.

<i>T</i> (°C)	<i>Ecuación de ajuste</i>	<i>r</i> ²
40	$T_{s2} = 8E-12t^6 - 5E-09t^5 + 1E-06t^4 - 0.0002t^3 + 0.01t^2 - 0.3614t + 319.49$	0.997
70	$T_{s2} = 9E-12t^6 - 6E-09t^5 + 2E-06t^4 - 0.0002t^3 + 0.014t^2 - 0.4994t + 351.01$	0.991
100	$T_{s2} = 1E-11t^6 - 8E-09t^5 + 2E-06t^4 - 0.0002t^3 + 0.0165t^2 - 0.5833t + 383.98$	0.995

Tabla K.3 Ecuaciones de ajuste para los datos del balance de energía para una carga de 1.2 kg.

<i>T</i> (°C)	<i>Ecuación de ajuste</i>	<i>r</i> ²
40	$T_{s2} = 1E-11t^6 - 6E-09t^5 + 2E-06t^4 - 0.0002t^3 + 0.015t^2 - 0.5341t + 321.17$	0.996
70	$T_{s2} = 1E-11t^6 - 8E-09t^5 + 2E-06t^4 - 0.0003t^3 + 0.0205t^2 - 0.7707t + 355.88$	0.997
100	$T_{s2} = 3E-11t^6 - 2E-08t^5 + 5E-06t^4 - 0.0006t^3 + 0.0381t^2 - 1.1618t + 387.86$	0.983