



Programa de la asignatura:

# Operaciones unitarias II

**U2** | Secado



DCSBA



BIOTECNOLOGÍA



## Índice

Presentación de la unidad.....	3
Propósitos de la unidad.....	3
Competencia específica.....	4
2.1. Definición de secado.....	4
2.1.1. Condiciones externas.....	6
2.1.2. Condiciones internas.....	11
2.2. Métodos de secado.....	14
2.2.1. Evaporación.....	19
2.2.2. Vaporización.....	24
2.2.3. Fases del secado.....	25
2.3. Aplicaciones.....	29
2.3.1. Secado en lechos fluidizados.....	29
2.3.2. Aplicaciones de secado en sistemas biológicos.....	32
2.4. Factores físicos que influyen en el secado.....	34
2.4.1. Tamaño de partícula.....	34
2.4.2. Profundidad de lechos.....	37
2.4.3. Eficiencia térmica.....	38
2.4.4. Efecto de la presión.....	39
2.5. Equipos de secado.....	40
2.5.1. Evaporadores.....	41
2.5.2. Ciclones.....	42
2.5.3. Solares.....	43
Actividades.....	45
Autorreflexiones.....	46
Cierre de la unidad.....	46
Para saber más.....	47
Fuentes de consulta.....	49



## Presentación de la unidad

En esta unidad aprenderás la importancia del secado en procesos biotecnológicos y de las principales variables que dominan el proceso. Veremos que cada tipo de material necesita de un proceso único de secado y que existen diferentes variables que podemos controlar para mejorar dicho proceso. Veremos que la velocidad de secado, la presión y el tamaño de partícula tienen un marcado efecto en el secado de materiales. Seguramente lo que estudiarás a continuación te será de mucha ayuda en tu formación profesional.

## Propósitos de la unidad



Al finalizar la unidad lograrás:

- Describir las variables fisicoquímicas de la operación de secado
- Describir los principales métodos de secado en sistemas biológicos.
- Describir las principales variables físicas del proceso de secado.
- Determinar equipos de secado más comunes de productos biológicos.



## Competencia específica



**Explicar** los fundamentos de la operación de secado a través de sus variables y métodos de análisis para su aplicación en el tratamiento, transformación y conservación de productos biotecnológicos.

### 2.1. Definición de secado

Iniciamos la segunda unidad de la asignatura de Operaciones unitarias II. Vamos a empezar a definir lo que debemos de entender como secado. El secado lo podemos definir como una operación unitaria cuyo fundamento consiste en separar la humedad de sólidos por medio de una corriente de gas que generalmente es aire. El secado involucra procesos simultáneos de transferencia de energía y de masa. La transferencia de energía se presenta cuando el gas caliente transfiere calor al sólido que tiene una temperatura más fría que el gas, este fenómeno de transporte tiene como resultado que la presión de vapor del sólido aumente y sea mayor que la presión de vapor del gas lo que provoca que el gas extraiga agua del sólido para alcanzar el equilibrio. En esta última etapa se presenta la transferencia de masa. Pero, ¿por qué secamos los materiales?, el secado tiene varias funciones, entre las principales podemos mencionar que el secado sirve para diseñar procesos de preservación de materiales que son susceptibles a la descomposición por factores físicos y/o biológicos, el secado facilita el manejo y almacenaje de productos, puede reducir costos de transporte y de distribución y puede conferir ciertas propiedades a los materiales como compresibilidad y concentración de solutos que pueden ser muy apreciados en la industria de los alimentos.

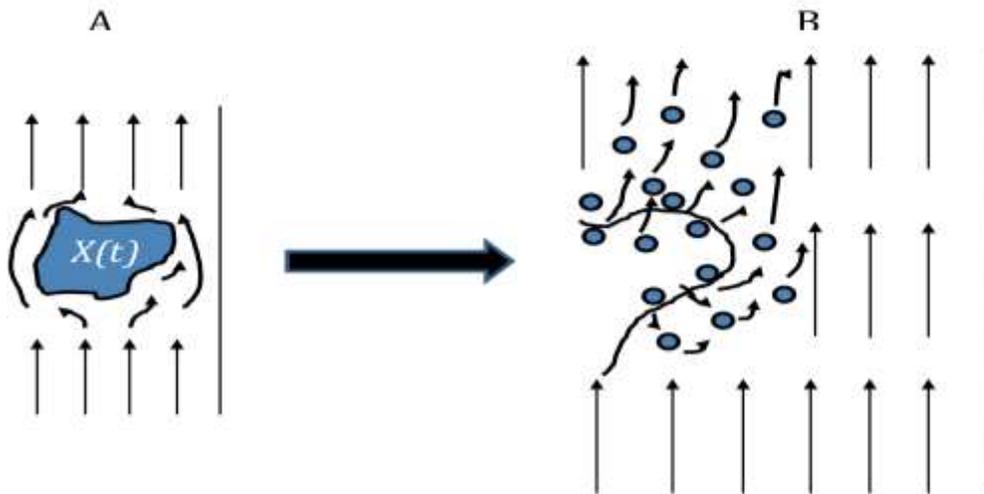
En el secado no se presenta cambio de fase ya que nunca se llega al punto de ebullición del líquido, esto es importante a tomar en cuenta ya que si llegáramos al punto de



ebullición de agua, todos los materiales de un producto biológico se verían afectados en sus propiedades tanto físicas como biológicas.

En la figura 1 se presenta una concepción del proceso de secado de materiales sólidos, se observa el soluto representado por  $X(t)$  el cual está sometido a una corriente gaseosa a mayor temperatura. En este proceso, el sólido empieza a perder humedad, es decir agua, que podríamos interpretar como el cambio de composición o concentración de humedad o agua respecto al tiempo, ya que el paso de un flujo de gas o aire caliente hace que el soluto pierda peso conforme pasa el tiempo de ahí que la concentración  $X$  está en función de  $t$  ( $X(t)$ ).

En la figura 1B hay una vista ampliada de dicho proceso, se observa como las moléculas de agua salen del sólido debido a las diferencias en las presiones de vapor del sólido y gas. Podemos concluir que la fuerza motora del secado es la diferencia en las presiones de vapor tanto del gas como del líquido por lo tanto, en cualquier proceso de secado deberíamos tener presente este concepto para optimizar dicho proceso. Otro factor importante que aunque no se menciona en la distancia tomada desde el seno del sólido hasta su superficie además de la porosidad del material. Si comparamos dos materiales por ejemplo una fruta y un grano (maíz por ejemplo) ¿cuál sería más fácil de secar?, tendríamos que averiguar primero la porosidad y posteriormente el tamaño de la muestra. Por simple deducción podríamos inferir que la fruta es un producto relativamente poroso si lo comparamos con la estructura de un grano, por lo tanto podríamos esperar que la porosidad del material sería una variable muy importante a tomar en cuenta, por otra parte, tendríamos también que definir el tamaño de la muestra a secar, es decir, entre más grande sea la muestra mayor tiempo le tomará al agua salir de la misma, también la transferencia de calor necesariamente se vería afectada ya que se dificultaría la transferencia de calor hasta el seno del sólido. Vamos a seguir con este concepto durante toda esta unidad. Pasemos ahora a estudiar con más profundidad la operación unitaria de secado.



**Figura 1.** Secado de un material sólido por medio de una corriente de aire caliente.

### 2.1.1. Condiciones externas

Para que haya secado necesariamente debe haber transferencia de calor para que a su vez, el agua se elimine en forma de vapor a partir de la superficie. Para el control de esta operación unitaria hay que tomar en cuenta el papel que juega la temperatura, flujo de aire y su humedad, área de superficie expuesta al flujo y la presión del sistema a todas estas condiciones se les conoce como condiciones externas del proceso de secado.

La temperatura es una variable de suma importancia en la operación unitaria de secado, las principales temperaturas que debemos controlar y conocer son la temperatura de bulbo seco que es la temperatura que obtenemos a partir de un termómetro normal y es la que se toma durante el proceso de secado. También es importante conocer la temperatura superficial del sólido a secar. Esta temperatura debe ser controlada ya que puede ser común y sobre todo en alimentos, que una excesiva temperatura superficial genere costras sobre el producto impidiendo la transferencia de masa, es decir, impide la salida de agua hacia el exterior del sólido. La otra temperatura no menos importante es la temperatura de bulbo húmedo, que es la temperatura que presenta la mezcla de aire-vapor de agua. Esta temperatura puede ser considerada como un indicador de la humedad en el ambiente y para nuestro caso, es una medida indirecta de la cantidad de vapor de agua que acarrea una corriente gaseosa. Si comparamos temperatura de bulbo húmedo con la temperatura de bulbo seco de aire seco no saturado a 100 °C ¿qué temperatura sería más alta?, la respuesta sería la temperatura de bulbo seco debido a que si se tiene una corriente gaseosa con vapor este provoca un enfriamiento conocido



como enfriamiento evaporativo. Entre mayor sea la diferencia entre la temperatura de bulbo seco y húmedo más seco estará el aire y menor será la humedad relativa. Si en el ambiente se tiene un 100 % de humedad relativa entonces alcanzaremos la temperatura del punto de rocío. Por ejemplo, en el secado de frutos generalmente se utilizan túneles de secado a través del cual se hace pasar una corriente de aire calentado, la fruta es expuesta a esta corriente de tal forma que el aire caliente por un fenómeno de convección acarrea el agua de la superficie de la fruta ¿cómo podríamos determinar el proceso de secado? Tenemos dos opciones, la primera implicaría sacar una muestra cada cierto tiempo y pesarla, por diferencia de peso podríamos monitorear la pérdida de agua, otra forma y que sería la más adecuada, es simplemente tomar la temperatura de bulbo húmedo y en tablas de temperatura estimar el contenido de agua en función de dicha temperatura. Las tablas las puedes consultar en manuales o libros especializados como el Manual del Ingeniero Químico de Perry.

El flujo de aire durante el proceso de secado es otra variable externa muy importante y que está directamente relacionada con la temperatura de bulbo seco, húmedo y de rocío. De preferencia, siempre buscamos inyectar a un túnel de secado aire seco o parcialmente saturado ya que la diferencia en temperatura y humedad favorece la salida de agua del sólido generándose un gradiente de humedad. Siempre hay que evitar el equilibrio en procesos de secado es decir, que la humedad del aire sea igual o muy cercana a la humedad del sólido ya que esto favorecería el secado del producto. Imagínate que tienes un túnel de secado donde tienes un sólido que deseas secar, necesitarías inyectar aire a una cierta velocidad y temperatura de tal forma que aceleres el proceso de secado. La presencia de humedad en el aire aumentaría conforme a la distancia del túnel de tal forma que la humedad final del aire sería muy alta en comparación del aire de entrada (Figura 2).

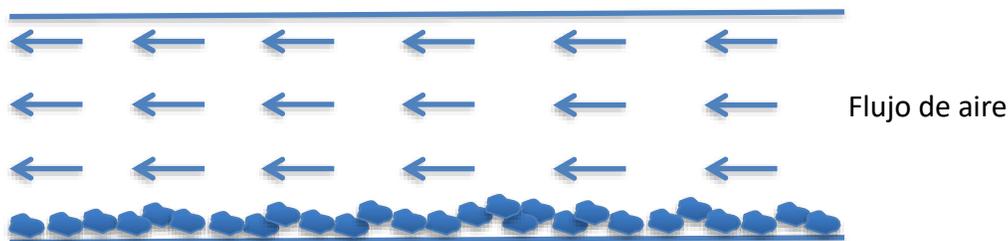
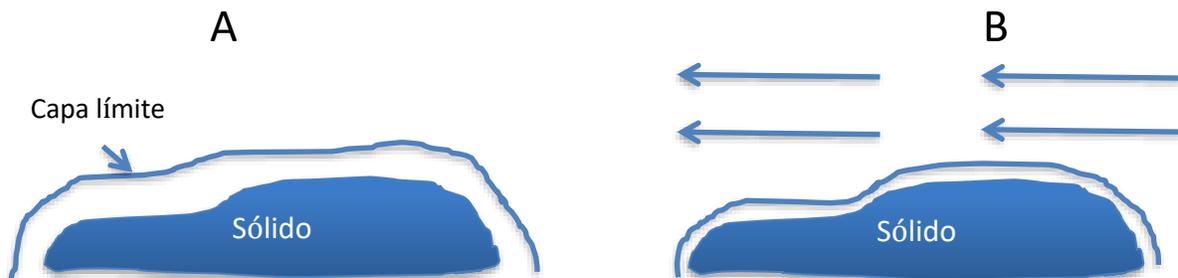


Figura 2. Secado de sólidos en un túnel de aire por inyección de aire caliente.

La velocidad o flujo de aire favorece el secado, ya habrás estudiado en asignaturas atrás que la convección acelera ya sea la transferencia de calor o la de masa disminuyendo la **capa límite** entre el aire y el sólido y favoreciendo por lo tanto, el secado. Recuerda que



en los procesos de transporte, ya sea de momentum, calor o masa, el principal reto es disminuir la capa límite, es decir el fluido (gas o líquido) que esta adherido al sólido y que no presenta movimiento y que es el obstáculo que impide la transferencia. La mejor forma de disminuir dicha capa límite es utilizando agitación o inyectando aire (Figura 3). Por lo tanto, para el diseño de equipos de secado será necesario tomar en cuenta el flujo de aire para optimizar dicho proceso. Un punto importante también que debes de cuidar es la temperatura de entrada del aire, si es demasiada alta y el aire es seco, se corre el riesgo de causar daños irreversibles al sólido, no por el hecho de inyectar aire seco a altas velocidades a un túnel de secado mejorará la velocidad de secado, si el secado es muy brusco, el sólido se verá afectado en sus propiedades fisicoquímicas. Por lo tanto, se deben de tener en cuenta tanto la velocidad y el % de humedad del aire de entrada.



**Figura 3.** Efecto de la velocidad de flujo de aire sobre la capa límite de un sólido.

En la figura 3A se aprecia una capa límite muy grande debido a que no hay ningún tipo de flujo presente, en la figura 3B el grosor de la capa límite disminuye por la acción de un flujo de aire externo. Esto mejorará el proceso de secado debido a que la capa inmóvil de gas es mínima favoreciendo la transferencia, es este caso de masa.

Otra variable importante es la superficie expuesta al secado. Entre mayor sea el área de secado, mejor será dicho proceso, por lo tanto, superficies muy grandes implicarán mayor tiempo de proceso, superficies pequeñas necesitarán de menor tiempo de secado. Recuerda, si tenemos un sólido único tendrá un área determinada, si este sólido lo dividimos en varios fragmentos, aumentamos el área de la superficie. Si tienes problemas de secado por el tamaño de la muestra lo arreglas fácilmente disminuyendo el tamaño de partícula del sólido que deseas secar como es el caso del secado por aspersión donde generas una nube de líquido que contiene el sólido a secar y que al entrar en contacto con una corriente de aire caliente instantáneamente eliminas el agua obteniendo el sólido que deseas, tal y como ocurre en la producción de leche en polvo o café instantáneo. Pero ¿cómo estimar el área de secado?, afortunadamente existen tablas que en función del tamaño de partícula (que es una variable que debes conocer ya que eres quien define tal condición) se sabe el área promedio superficial, con este dato puedes



determinar el área total del secado. No es una tarea fácil ya que debes hacer uso de modelos matemáticos que te ayudan a estimar el área total de tu sistema. Por ejemplo, para el secado de granos existen fórmulas ya establecidas que utilizan conceptos sencillos. La fórmula para estimar el área de secado para granos es la siguiente:

$$A = \frac{20PT}{N}$$

Donde:

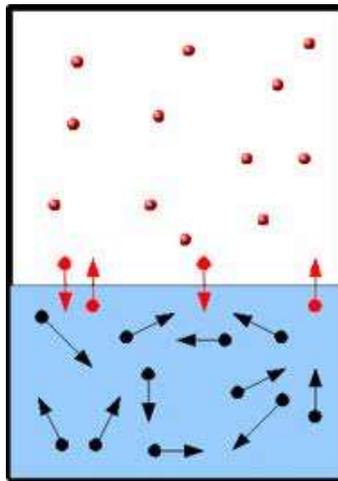
$A$  = área de secado (en  $m^2$ )

$P$  = Cantidad de granos a secar ( $m^3$ )

$T$  = Tiempo de secado (h, días, etc.)

$N$  = Número de cosechas a secar

Por otra parte, no en todos los procesos es posible triturar las muestras a secar, por lo tanto, los tiempos de secado se deben prolongar por lo que debes controlar tanto el flujo de secado como la temperatura de entrada del aire así como su humedad de tal forma que el secado sea más lento y que no genere la formación de costras que impidan la transferencia de masa (agua). Cabe señalar que no siempre debemos tratar a los sólidos a secar como partículas, por ejemplo, para el secado de papa basta con estimar el área transversal de secado y posteriormente hacer un promedio de esta área. Finalmente el siguiente factor externo a controlar es la presión de vapor tanto del sólido como la de la corriente gaseosa. La presión de vapor es la presión del sistema cuando un sólido o un líquido se encuentran en equilibrio con su vapor (Figura 4). Ya hemos comentado que en el secado no buscamos el equilibrio ya que esto perjudicaría la eficiencia de esta operación unitaria. Una corriente caliente no saturada con vapor de agua presenta una presión de vapor más baja que una corriente caliente saturada con vapor de agua, por lo tanto, si la corriente caliente no saturada con vapor de agua entra en contacto con un sólido que está saturado con agua, se genera un desequilibrio que como consecuencia hace que migre agua hacia el material que presenta menor presión de vapor que para nuestro caso es el vapor caliente.



**Figura 4.** Presión de vapor en el equilibrio.

El proceso anteriormente descrito facilita la extracción de humedad de diversos sólidos, podríamos decir que la fuerza motora que facilita la extracción de agua es la diferencia de las presiones de vapor, por lo tanto, el gradiente que se forma es mucho mayor cuando la diferencia de las presiones de vapor o de las humedades relativas entre la corriente gaseosa y el sólido, son muy grandes y por lo tanto, el secado es más rápido (Figura 5).



**Figura 5.** Diferencia de las presiones de vapor que son las que definen la dirección de salida de agua. Fuente: Met Ed.

Para realizar los cálculos correspondientes en la operación unitaria de secado debemos tomar en cuenta al proceso de convección que es el que arrastra el vapor de agua de la superficie del sólido y la transferencia de masa que es la responsable de la salida de partículas de agua del interior del sólido a la superficie del mismo, por lo tanto las ecuaciones que rigen estos fenómenos son las siguientes:



$$q = h(T_s - T_g) \text{ para la transferencia de calor y,}$$

$$w = k(\rho_s - \rho_g) \text{ para la transferencia de masa}$$

Los subíndices  $g$  es para el gas húmedo y  $s$  para la superficie del sólido. Lo complicado de usar las ecuaciones anteriores es determinar los valores de  $h$  (coeficiente de transferencia de calor) y  $k$  (coeficiente de transferencia de masa). Hay dos métodos que son los más comunes, el primero es utilizar relaciones analíticas adecuadas o por aproximaciones utilizando ecuaciones diferenciales y las condiciones en la frontera. El otro método es utilizar tablas que aparecen en manuales de ingeniería química (Perry, Manual del Ingeniero Químico) para procesos ya establecidos. Hay que tener en cuenta que la transferencia de calor a través de materiales mojados dependes de otros factores que hasta ahora no hemos tomado en cuenta y que son de suma importancia para optimizar el secado. Para facilitar dicho cálculo se utilizan números adimensionales ya establecidos para proceso de secado. En la Tabla 1 se presenta una relación de estos números adimensionales.

**Tabla 1.** Números adimensionales útiles en los procesos de secado.

Nu = Número de Nusselt  
 Re = Número de Reynolds  
 Sh = Número de Sherwood  
 Pr = Número de Prandtl  
 Sc = Número de Schmidt  
 Gr = Número de Grashof

Transferencia de calor	Relación de números adimensionales
Convección forzada	$Nu = f_1(Re, Pr)$
Convección libre	$Nu = f_2(Gr, Pr)$
Transferencia de masa	
Convección forzada	$Sh = f_3(Re, Sc)$
Convección libre	$Sh = f_4(Gr, Sc)$

### 2.1.2. Condiciones internas

Iniciaremos este tema con la siguiente pregunta ¿qué le pasa al material sólido durante el secado?, trataremos de explicar que es lo que le pasa al material, hay que imaginarnos todo el material sólido empieza a sufrir un proceso de desecación debido a la migración de agua desde su interior al exterior por efecto de la temperatura externa y de la presión de vapor del exterior. Como primera etapa sucede una **transferencia de calor** de la corriente gaseosa al sólido que tiene una menor temperatura al inicio del proceso, se genera por lo tanto, un gradiente de temperatura donde la mayor temperatura se presenta en la superficie del sólido y la menor en el centro del mismo. La mayor temperatura en la



superficie del sólido provoca que el agua presente en esta se evapore rápidamente generando otro gradiente pero en este caso, de humedad donde la mayor humedad está en el centro del sólido y la menor en su superficie (Geankoplis, 2011). Ambos gradientes junto con la presión de vapor de la corriente gaseosa, son las fuerzas motrices de la operación unitaria de secado. En la figura 6 se presenta un simulación del proceso de secado, un sólido es sometido a una corriente gaseosa con una temperatura  $T_1$  y una humedad  $H_1$ , el sólido posee a su vez una temperatura  $T_2$  y una humedad  $T_2$ , donde  $T_1 > T_2$  y  $H_1 < H_2$ , se generan entonces dos gradientes; un gradiente de temperatura  $\Delta T$  ( $T_1 - T_2$ ) y un gradiente de humedad  $\Delta H$  ( $H_2 - H_1$ ) que son los responsables de la salida de agua del sólido. ¿Qué mecanismos favorecen la migración de agua hacia el exterior? podemos mencionar varios dentro de los más importantes está la difusión del agua a través del material, el flujo capilar, la porosidad del material y la presión interna causada por el encogimiento del sólido durante el secado.

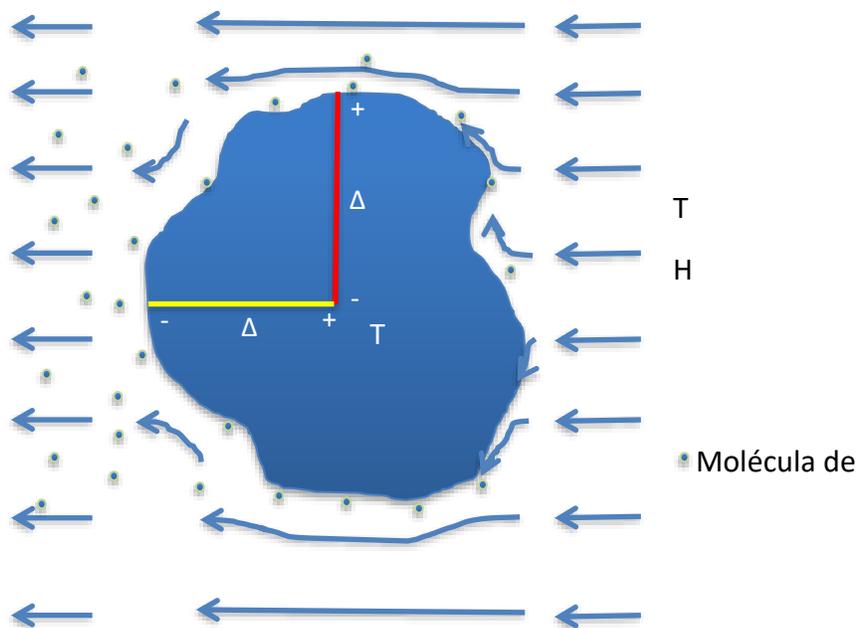
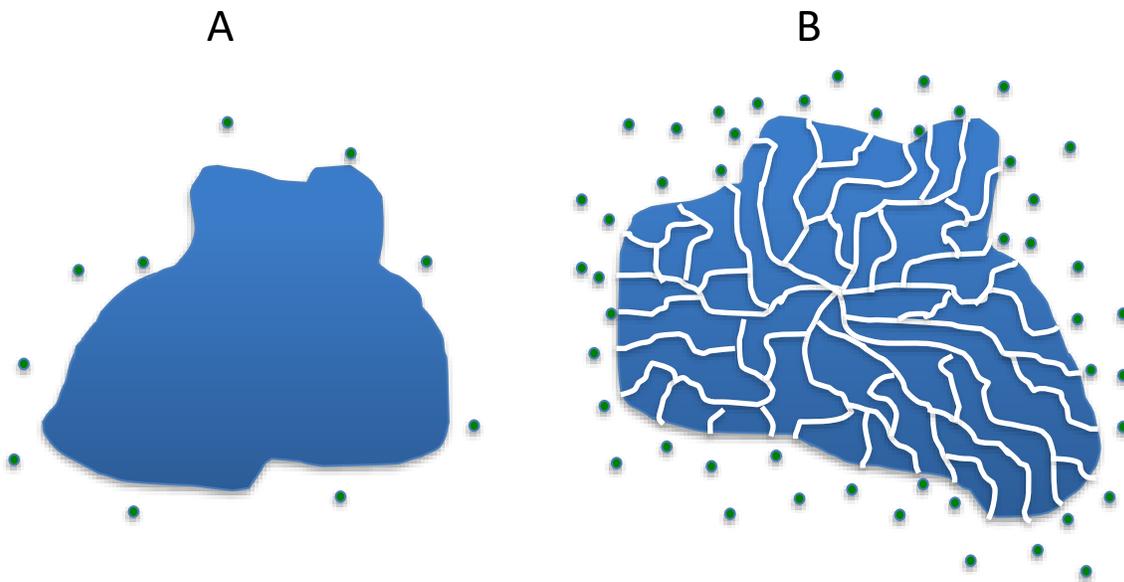


Figura 6. Representación del proceso de secado de un sólido.

**La difusión del agua** del interior del sólido al exterior depende de varios factores, uno es el gradiente de temperatura que se forma dentro del sólido, la formación del **gradiente** se debe específicamente a un proceso de conducción de calor, recuerda cómo se transmite el calor, por conducción, por convección y por radiación (Bird, 1980) y que la dirección de transmisión de calor es desde el punto más caliente (para nosotros, la corriente gaseosa) hacia el punto más frío (centro del sólido a secar). Este gradiente favorece la salida del agua ya que le imprime energía a las moléculas aumentando la presión de vapor y por lo tanto la presión interna del sólido favoreciendo la salida del agua. También es importante



señalar que la porosidad juega un papel muy importante en el secado ya que un material muy poroso se seca más rápidamente que un material con poca porosidad, por lo tanto el llamado flujo capilar es una variable importante a tomar en cuenta debido a que debemos favorecer la formación de millones de canales capilares en todo el volumen del sólido que favorecen el secado y esto se logra con sólidos porosos. En la figura 7 se presenta un esquema que representa lo anteriormente descrito, es un material poco poroso (Figura 7A) la evaporación de agua solo se da en la superficie principalmente, un material poroso (7B) favorece una salida más rápida de agua a través de todo el volumen del sólido por el flujo capilar formado.



**Figura 7.** Salida de agua en dos sólidos con porosidad diferente. 7A sólido poco poroso o muy compacto, 7B sólido con alta porosidad.

Ahora bien, ¿cómo podemos estimar la difusión de agua de un material hacia el exterior?, es claro que la difusión de agua depende de la transferencia de calor, por lo tanto podemos construir curvas de desorción, es decir curvas de extracción de agua a temperatura constante como en el caso del secado de zanahoria donde es posible estimar el tiempo de secado a una temperatura de 37 °C en función de su pérdida de agua. Carbonell y otros (1984) observaron que el secado de zanahoria podía ser estimado a partir de curvas de desorción, también observaron que la presencia de solutos hacía más difícil la extracción de agua por lo que concluyeron que la adición de solutos como sal, favoreció una menor pérdida de agua en el producto final. Este resultado es de suma importancia ya que nos puede dar una idea de los medios en los cuales podemos favorecer el secado de productos biológicos.



En un material poroso se pueden presentar dos diferentes tipos de arreglo de las capas de aire caliente, estos arreglos son los paralelos en cuyo caso el calor se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$Q_{t1} = A \frac{\lambda_1}{b} (T_1 - T_2)$$

Y para arreglos perpendiculares la cantidad de calor transferida se estima mediante la relación:

$$Q_{t2} = A \frac{\lambda_2}{b} (T_1 - T_2)$$

Siendo  $b$  = espesor del cuerpo poroso en dirección de la transferencia de calor.  $\lambda$  es el coeficiente de transferencia de calor y se pueden calcular mediante las siguientes expresiones:

$$\lambda_1 = (1 - \varepsilon)\lambda_S + \lambda_B$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\frac{(1 - \varepsilon)}{\lambda_S} - \frac{\varepsilon}{\lambda_B}}$$

Donde:

$S$  = Sólido

$B$  = Gas seco

$\varepsilon$  = Porosidad

## 2.2. Métodos de secado

Ahora vamos a estudiar los diferentes métodos de secado, antes de la elección del mejor método de secado tendríamos que definir qué es lo que vamos a secar porque realmente el que define el método de secado es el producto ¿por qué?, durante el secado se puede causar un daño irreversible al sólido o al producto, puede haber efectos de endurecimiento, se puede presentar deshidratación debida a un exceso en la velocidad de secado y puede presentarse desnaturalización del producto, hay que tomar en cuenta que si el producto que se va a secar es de origen biológico y si nos excedemos en la temperatura de secado, es muy posible que se presente desnaturalización de las proteínas presentes por lo que se puede generar una caída en el valor nutricional, colores indeseables o generación de sabores poco agradables. La desnaturalización de proteínas es un proceso irreversible. Vamos hablar concretamente del secado de frutas, la fruta es considerada como un material muy poroso que puede ser sometido fácilmente a secado, sin embargo hay que tener mucho cuidado del cómo se va a secar, recuerda, la fruta es un material biológico que está sujeto a diversos fenómenos asociados a su naturaleza, si la velocidad de flujo es muy alta y además presenta alta temperatura es muy probable que



la superficie de la fruta se seque rápidamente de tal forma que haya encogimiento de la misma bloqueando el flujo capilar de agua del interior al exterior, además, puede haber reacciones entre proteínas y carbohidratos que generan sabores y colores desagradables, por lo tanto, antes de secar un producto debemos determinar ciertos factores que a continuación estudiaremos.

De manera muy general, los métodos de secado se pueden dividir en dos grandes grupos, (a) los métodos adiabáticos en los cuales se inyecta una corriente gaseosa caliente predominando un mecanismo convectivo y (b), procesos no adiabáticos en los cuales la transferencia de calor se da por métodos conductivos. Ya hemos hablado de la velocidad de secado, esta variable se relaciona directamente con el tiempo de secado que a su vez está regido por la velocidad de transferencia de calor y de masa. La transferencia de calor dependerá del método de secado y la transferencia de masa del tipo de sólido a secar es decir, si tiene estructura compacta o granular. Es por lo tanto necesario generar curvas de secado que nos permiten además de controlar el proceso, también nos permiten predecirlo.

Una curva de secado no es más que una cinética de secado, es decir, la cinética de secado nos indica la cantidad de humedad promedio que pierde el sólido respecto al tiempo. Es posible también estimar la cantidad de energía invertida en dicho proceso. Existen modelos matemáticos que explican el fenómeno del secado. El modelo más común trata a todas las partículas como esferas y a partir de esto se genera la siguiente relación:

$$h\pi d_p^2 \psi (T_g - T_s) = N \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_s \Delta H$$

Donde:

$$N = \frac{6h\psi(T_g - T_s)}{\rho_s d_p \Delta H}$$

$d$  = Diámetro de la partícula

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor

$\psi$  = Factor de forma de la partícula

$\rho$  = Densidad del sólido

$\Delta H$  = Calor latente

$g$  = gas

$s$  = Sólido

$T$  = Temperatura



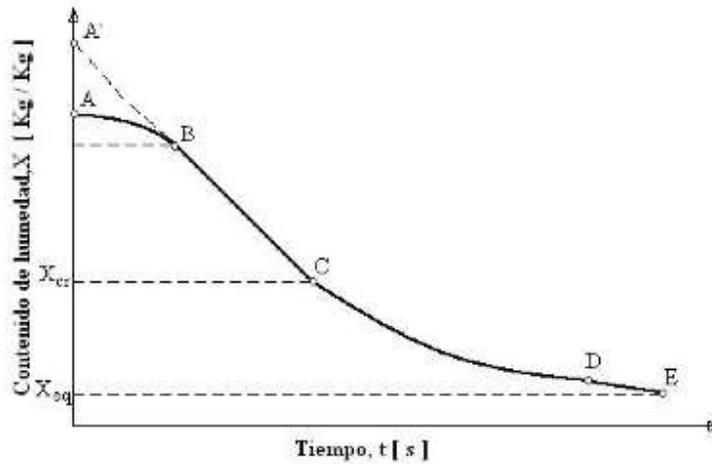
Analizando la ecuación anterior se puede deducir que el secado aumenta al disminuir el tamaño de partícula, al incrementar la temperatura del gas y la velocidad de secado. El coeficiente de transferencia de calor se puede estimar a partir de la relación:

$$h \approx \frac{u_g^{0.5}}{d_p^{1.5}}$$
$$\text{y } N \approx T_g \frac{u_g^{0.5}}{d_p^{0.5}}$$

Donde  $u_g$  es la velocidad superficial del gas,  $d_p$  es el diámetro de la partícula y  $T_g$  es la temperatura del gas húmedo.

¿Cómo construimos una curva de secado?, antes de construirla debemos saber que no solo basta con construir una curva de secado, también es necesario determinar el contenido de humedad respecto al tiempo de secado que realmente es la curva de secado, también es necesario conocer la curva de velocidad de secado que no es más que la velocidad de secado respecto al contenido de humedad del material y finalmente necesitamos estimar la curva de temperatura la cual nos indica la temperatura del sólido respecto al contenido de humedad. Generalmente esta curva se construye primero en el laboratorio ¿cómo?, sacando muestra periódicamente del proceso de secado y determinando la masa, temperatura y el tiempo de análisis. Una curva típica de secado se presenta en la figura 8 donde se aprecian varios puntos importantes. El punto de A-B nos indica el inicio del procesos de secado, aún en esta parte el proceso no se puede considerar como un proceso en estado estacionario, la recta de B a C es conocido como el periodo de secado constante, en este punto, el sólido pierde humedad de manera constante, posteriormente aparece el punto crítico es donde el sólido pierde humedad pero no de forma constante, la velocidad de secado empieza a disminuir en este punto.

Finalmente se llega a los puntos D y E donde la curva empieza a mostrar un comportamiento asintótico respecto al eje X que es el tiempo de secado, en este punto la pérdida de humedad es ya casi nula. El sólido ha perdido la mayor parte de la humedad que inicialmente contenía.



**Figura 8.** Curva típica de secado de un material poroso.

La curva de velocidad de secado (Figura 9) que se obtiene a partir de datos experimentales arroja también información muy valiosa del proceso, por ejemplo a partir de la función  $w_D = f(x)$  podemos obtener información de la cantidad de humedad removida desde el material seco/unidad de tiempo/unidad de superficie secada. Esta función puede escribirse como:

$$w_D = -\frac{m dX}{A dt}$$

o como:

$$N = \frac{dX}{dt}$$

Puede observarse también periodos donde la velocidad de secado aumente respecto al contenido de humedad y un periodo de secado constante. Este fenómeno se presenta en alimentos con alto contenido de humedad como por ejemplo en el secado de tomate donde se necesita de altas velocidades de secado para eliminar el alto contenido de agua. Una característica de los procesos de secado es la similitud en lo referente al comportamiento, es decir, en la gran mayoría de los casos, todos los productos biológicos de comportan de manera similar, esto es que sus curvas de secado son similares en cuanto a las tendencias presentadas cambiando únicamente las pendientes y los tiempos de secado constantes que es donde realmente podemos identificar a los diferentes procesos.

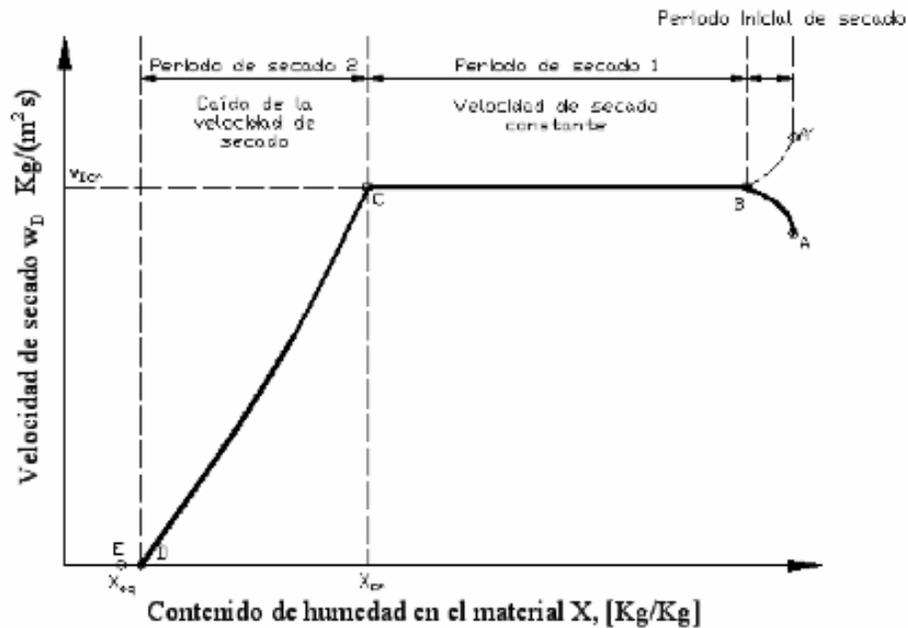


Figura 9. Curva de velocidad de secado de un material poroso.

Otra variable importante es el cálculo del tiempo de secado que define la forma de la **curva de secado**. El tiempo de secado debe ser diferente tanto para el periodo uno como para el dos, por lo tanto, debe ser calculado separadamente. El tiempo se obtiene a partir de la siguiente integral:

$$\int_0^t dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{w_D}$$

Donde  $X_1$  y  $X_2$  es el contenido de humedad desde el tiempo cero hasta el tiempo  $t$  respectivamente. Como ya habíamos comentado, los tiempos de secado para los dos periodos se deben estimar de manera independiente. Las siguientes relaciones se utilizan para este fin:

$$t_1 = \frac{m_s}{Aw_{D1}} (X_1 - X_{cr})$$

$$t_2 = \frac{m_s}{A} \frac{X_{cr} - X_2}{w_{D1} - w_{D2}} \ln \frac{w_{D1}}{w_{D2}}$$

Además:



$$t = t_1 + t_2$$

Ahora vamos a estudiar dos procesos de secado que son comunes en el área de la biotecnología.

### 2.2.1. Evaporación

La evaporación es una operación unitaria que generalmente es tratada como única sin embargo, está estrechamente relacionada con la operación unitaria de secado ya que en esta operación hay pérdida de agua de un líquido a una corriente gaseosa. Podemos decir que la evaporación implica un proceso de concentración debido a que se presenta un efecto de concentración por la pérdida de agua de un líquido cuando es sometido a temperaturas altas, generalmente vapor de agua. Para que esta operación unitaria funcione adecuadamente se toman en cuenta diversos factores como la concentración del líquido, la solubilidad, la sensibilidad térmica de los materiales, formación de espuma, presión y temperatura y la formación de incrustaciones en el material de construcción (Geankoplis, 2011). La concentración del líquido juega un papel de suma importancia ya que al inicio del proceso el líquido presenta una viscosidad parecida al agua y un coeficiente de transferencia de calor alto, conforme avance el proceso y el líquido va concentrándose, aumenta la viscosidad y el coeficiente de transferencia de calor empieza a disminuir, si el líquido no es agitado, se dificulta la transferencia de calor, por lo tanto, es necesario aplicar agitación al sistema (Brown, 1965).

La solubilidad afecta al producto final, hay que tomar en cuenta que al aumentar la concentración de soluto en el líquido es muy probable que se presenten problemas de cristalización ya que se excede el límite de solubilidad. Este problema se hace más evidente cuando la solución que ha sido evaporada se enfría, a baja temperatura, la solubilidad disminuye por lo que el soluto puede formar cristales. La formación de espuma es otro factor a tomar en cuenta, líquidos con alto contenido proteico o graso o con pH alcalinos, tienden a formar espuma que es arrastrada por el vapor y en ocasiones representan pérdidas fuertes para un proceso. En un proceso de evaporación hay una estrecha relación entre la temperatura y la presión. El agua ebulle a 100 °C a nivel de mar donde la presión atmosférica es de 1 atmósfera, si se aumenta la presión, la temperatura de ebullición aumentará. Es importante señalar que al aumentar la concentración de sólidos en el líquido, aumenta la temperatura de ebullición, este aumento puede afectar características fisicoquímicas de los materiales y se hace más evidente si se trata de un alimento, por lo tanto, si esperamos tener este tipo de problemas es necesario evaporar a temperaturas por debajo a los 100 °C ¿cómo? utilizando un sistema de vacío. Cuando un líquido presenta altas concentraciones de solutos se generan algunos materiales que pueden incrustarse sobre el material de que está construido el equipo de evaporación,



este fenómeno causa que el proceso de evaporación sea menos eficiente ya que provoca una caída del coeficiente de transferencia de calor debido a que estas incrustaciones representan una resistencia a la transferencia de calor por lo tanto, para el diseño de equipo será necesario tomar en cuenta un material que prevenga la adhesión de materiales (Thompson y Ceckler, 1977).

Un ejemplo es la elaboración de leches condensadas. En este tipo de productos, se elimina el agua de la leche mediante un proceso evaporativo, además, se le adiciona cantidades considerables de azúcar que contribuyen en el sabor y en la viscosidad final del producto. En este proceso, conforme aumenta la viscosidad, disminuye la transferencia de calor además, si se quiere mantener una temperatura constante de evaporación se corre el riesgo de que el azúcar presente se caramelize imprimiéndole al producto un color oscuro producto de dicha reacción. Por otra parte, las altas concentraciones de azúcar pueden causar que inicie un proceso de cristalización que llega a depositarse sobre la superficie del equipo dificultando la transferencia de calor y favoreciendo reacciones de oscurecimiento ¿cómo evitarlo?, hay muchas estrategias, una es evaporar la leche líquida hasta una concentración dada, aumentar el contenido de sólidos adicionando leche en polvo y finalmente adicionar el azúcar para imprimir el sabor característico del producto.

### **Equipos de evaporación**

Existe una gran diversidad de equipos de evaporación, el principio de todos ellos es evaporar un solvente, generalmente agua por contacto del líquido con una superficie metálica que es la que favorece la transferencia de calor. Esta superficie generalmente es metálica y puede ser de acero inoxidable, aluminio o de algún metal o aleación que no presente reacciones secundarias con el proceso. Antes de elegir el equipo primeramente debemos que tener claro que es lo que se va a evaporar, la viscosidad, contenido de sólidos (y de qué tipo son), etc. Para estimar el tamaño de las marmitas sólo es necesario saber el volumen o cantidad del material a ser evaporado. No se necesitan de equipos adicionales sobre todo si se trata de marmitas abiertas. Las marmitas son el equipo más sencillo para la evaporación, generalmente se utilizan equipos abiertos para acelerar la pérdida de agua, algunos cuentan con agitación, el calentamiento puede ser con vapor sobrecalentado o con flama directa. Este tipo de equipos generalmente se utilizan para concentrar mermeladas, conservas, etc.

El siguiente equipo son los evaporadores de tubos horizontales este equipo es similar a los pasteurizadores. Los tubos están colocados de manera horizontal, dentro de ellos circula vapor de agua y alrededor está el líquido que se desea concentrar. El vapor condensado dentro de los tubos es nuevamente utilizado para generar vapor en la caldera, mientras que el vapor que se genera por el contacto del líquido con los tubos es



colectado en la parte superior del equipo y se colocan deflectores para evitar que el condensado regrese al líquido. La eficiencia del equipo dependerá de la longitud de los tubos. Estos equipos generalmente se utilizan para procesos biotecnológicos donde se requiere preservar aromas y sabores.

Una variación al equipo anterior son los evaporadores verticales con circulación **natural**. En este equipo, el líquido circula por el interior de los tubos y el vapor de agua se condensa alrededor de los tubos. Al igual que en el equipo anterior, la eficiencia del equipo dependerá de la longitud del tubo. Este equipo es muy útil cuando se desea evaporar agua de soluciones muy viscosas, la circulación natural de líquido debido a la baja densidad por acción de la temperatura hace que el coeficiente de transferencia de calor se mantenga alto a lo largo de los tubos. Estos equipos se utilizan cuando la viscosidad del líquido son problemas en la evaporación.

Los evaporadores de tubos tanto horizontales como verticales se apegan a normas de diseño similares, los diámetros de los tubos van de 2 a 10 pulgadas y las longitudes (de acuerdo a necesidades) de 20 a 40 pies y presentan coeficientes de transferencia de calor de 200-600 unidades.

Otro equipo común para la evaporación de productos biotecnológicos son los evaporadores con circulación forzada. En estos equipos, el líquido a evaporar es bombeado a través del evaporador forzando su paso a través del sistema este hecho hace más eficiente la evaporación ya que mantiene constante el coeficiente de transferencia de calor en todo el sistema.

En un evaporador de película agitada la principal resistencia la presenta el líquido a concentrar, este problema se soluciona generando flujos turbulentos que aumentarán el coeficiente de transferencia de masa. El equipo consiste en un tubo grande donde por el interior circula una película de líquido y por el exterior vapor de agua. El equipo cuenta con un agitador que aumenta la velocidad de flujo. El líquido concentrado sale por la parte inferior y el vapor por la parte superior. Este equipo se utiliza para fluidos viscosos sensibles al calor como gelatinas, antibióticos y jugos de frutas.

Te recomendamos buscar en internet imágenes de marmitas, evaporadores de tubos horizontales, evaporadores verticales con circulación natural, evaporadores con circulación forzada y evaporador de película agitada.

Hay un método general para calcular los evaporadores, para esto necesitamos saber: Los datos del problema como son el número de efectos ( $N$ ), el tipo de alimentación de vapor, el flujo en la alimentación ( $F$ ), la presión del vapor generado por la caldera ( $PS$  o  $TS$ ), la presión y/o temperatura de saturación del último efecto ( $PN$  o  $TbN$ ), los



coeficientes globales de transferencia de calor ( $U_1, U_2, \dots, U_n$ ), la concentración inicial y final ( $X_i$  y  $X_f$ ). También se necesitan algunos datos obtenidos de tablas como calor latente de vaporización del vapor vivo ( $\lambda S$ ), el calor latente de vaporización del vapor del último efecto ( $\lambda N$ ) y la temperatura de ebullición del agua que corresponde a la presión de operación del último efecto ( $TbN$ ).

Con estos datos se realiza los balances de materia correspondientes. En esta etapa se calculan, mediante balances de materia, los flujos másicos de las corrientes del líquido concentrado y del vapor total generado ( $VT$ ). En el caso de la primera, la corriente de este producto puede salir en cualquier efecto, dependiendo del sistema de alimentación que se esté utilizando. Si la alimentación es en corriente directa, la disolución concentrada saldrá del último efecto ( $LN$ ); si es en contracorriente saldrá del primer efecto  $L_1$  y si es en corriente mixta podrá salir en cualquier efecto, inclusive efectos intermedios  $L_i$ . Si el evaporador es de un solo efecto entonces el balance se realizar simplemente tomando en cuenta dicho efecto. El área de transferencia de calor se estima utilizando la siguiente expresión:

$$A_i = \frac{Q_i}{U_i \Delta T_i}$$

La economía de equipo se estima por:

$$Economía = E = \frac{Capacidad}{Consumo} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{S}$$

Donde  $V_i$  es el volumen del evaporador y  $S$  es consumo de vapor. Si se tienen más efectos, los volúmenes son sumativos.

Ecuaciones de diseño para un evaporador de un efecto.

La ecuación de balance total para evaporadores de tubo es la siguiente:

$$F + V_0 = V_1 + L_1 + D$$

La expresión para el balance de soluto es:

$$F x_F' = L_1 x_1'$$

La ecuación de balance total de calor es:

$$V_0 \lambda_{V_0} + F h_F = V_1 H_1 + L_1 h_1$$

Ecuación de velocidad de la transferencia de calor:



$$V_0 \lambda_{V_0} = UA(-\Delta T)$$

Donde:

$F, V_0, V_1, L_1, D$  = Cantidades de las corrientes que entran y salen del evaporador.

$H$  = Entalpía por unidad de masa de una corriente de líquido designada por un subíndice (Btu/lb).

$H$  = Entalpía por unidad de masa de una corriente de líquido designada por un subíndice (Btu/lb).

$\lambda$  = Calor latente de evaporación por unidad de masa de corriente designada por un subíndice (Btu/lb).

$X'$  = Fracción masa del soluto en la corriente designada por un subíndice (lb de soluto/lb de corriente total).

### Ecuaciones de diseño para evaporadores de más de un efecto

Para el cálculo de la eficiencia de evaporadores de más de un efecto se deben hacer ciertas suposiciones como son el hecho de que todas las áreas de los evaporadores son iguales, los coeficientes de transferencia de calor son iguales y no existen incrementos en el punto de ebullición. Bajo estas condiciones, el balance total de calor será:

$$q_t = q_1 + q_2 + q_3 + \dots$$

donde:  $q_t$  es la velocidad total de transferencia de calor en todos los efectos y  $q_1, q_2, q_3$ , son las velocidades de transferencia de cada uno de los efectos individuales. Como las áreas y los coeficientes de transferencia son iguales entonces:

$$q_t = U_1 A_1 (-\Delta T_1 - \Delta T_2 - \Delta T_3 - \dots) = U_1 A_1 (\Delta T_{total})$$

que es la velocidad de transferencia de calor que es la misma que se obtiene con un solo efecto operando entre los mismos niveles de temperatura. Para realizar el balance se deben tomar en cuenta las condiciones de entrada y de salida en cada uno de los evaporadores. De esta forma por ejemplo, para un evaporador de dos efectos el balance de material respecto al efecto 1 sería:

$$L_2 = L_1 + V_1$$

El balance de sólidos con respecto al efecto 1:



$$L_2 x_2' = L_1 (\% \text{ sólidos})$$

Balance de sólidos con respecto al efecto 2:

$$F = L_2 + V_2$$

El balance de calor para el efecto 1:

$$V_0 \lambda_{V_0} + L_2 h_2 = L_1 h_1 + V_1 H_1$$

Balance de calor para el efecto 2:

$$V_1 (H_1 - h_{D_2}) + F h_F = V_2 H_2 + L_2 h_2$$

Y las ecuaciones de velocidad de transferencia de calor para el efecto 1:

$$V_0 \lambda_{V_0} = q_1 = U_1 A_1 (T_f - T_1)$$

La ecuación de velocidad de la transferencia de calor para el efecto 2:

$$V_1 [H_1 - (T_1 - 0) C_{liq}] = V_1 \lambda_{V_1} = q_2 = U_2 A_2 (T_1 - T_i)$$

Si  $q_1 = q_2$  entonces se puede estimar  $\Delta T$  a partir de la siguiente expresión:

$$U_1 A_1 (-\Delta T_1) = U_2 A_2 (-\Delta T_2)$$

### 2.2.2. Vaporización

La vaporización está íntimamente ligada con la evaporación, la vaporización implica un cambio de fase es decir, el fluido del estado líquido pasa al estado gaseoso. Se conocen dos tipos de vaporización, la ebullición y la evaporación, ¿Es lo mismo vaporización y evaporación? No se pueden considerar términos semejantes, ya explicamos lo que es evaporación, la vaporización se presenta cuando el secado se lleva a cabo por convección y solo se presenta cuando hay convección. Por lo tanto, para favorecer la vaporización necesitamos elevar la temperatura del sistema a 100 °C a 1 atm ya que a esta temperatura y presión, el agua hierve. Para alcanzar niveles de deshidratación buenos se necesita una gran cantidad de energía, este proceso es muy agresivo para



muchos materiales por las altas temperaturas que se necesitan para eliminar la mayor parte del agua. En este tipo de secado, el tamaño de partícula juega un papel muy importante, entre más pequeña sea la partícula, más rápidamente las partículas perderán agua (McCabe, 2007). Este principio se utiliza en los secadores por atomización que más adelante estudiaremos mejor.

La ebullición es el otro tipo de vaporización. En el caso de la ebullición, la vaporización de agua no se da del todo en la superficie, la mayor parte del agua que se vaporiza proviene del interior del líquido, la formación de burbujas en el seno del líquido se debe a que el interior alcanza una mayor presión de vapor que la presión atmosférica sobre la superficie del líquido esto hace que se genere vapor en el seno de líquido obligándolo a salir para poder igualar las presiones de vapor y la presión atmosférica. Si el líquido se calienta por arriba de su punto de ebullición se dice que es un líquido sobrecalentado. La formación de burbujas se puede favorecer con recipientes rugosos debido a que entre los intersticios de la superficie se acumula el vapor generado. En el caso de calentar un líquido en recipientes muy lisos (vidrio pirex) donde aparentemente no se observa ebullición por arriba a 100 °C se puede tener lo que se llama líquido supercalentado, cualquier perturbación o adición de una partícula puede provocar una violenta reacción ya que estos líquidos tienen gran cantidad de energía almacenada.

La velocidad de transferencia de calor en un vaporizador puede estimarse a partir de la siguiente relación:

$$q_v = -U_v A_v (T_f - T_v)$$

Y la velocidad de transferencia de calor al condensador es:

$$q_c = -U_c A_c (T_c - T_f)$$

Si se hace la suposición que no existe pérdida de calor a través de las paredes del recipiente, entonces  $q_v = q_c$ ; por lo tanto:

$$T_f = \frac{T_c U_c A_c + T_v U_v A_v}{U_c A_c + U_v A_v}$$

### 2.2.3. Fases del secado

Vamos a retomar lo visto en el tema de métodos de secado pero ahora aplicado al secado de alimentos. El secado de alimentos depende del tamaño del equipo, si es muy grande,



el secado es más rápido, también es importante estimar las condiciones de temperatura y de humedad de la corriente de aire que se utilizará además del tiempo en que se llegará a la humedad final requerida. Experimentalmente se determina la pérdida de peso respecto al tiempo sin detener el proceso de secado. Los valores obtenidos se tabulan en una gráfica de humedad contra tiempo ( $X$  vs tiempo). El gráfico obtenido es conocido como curva de sorción (curva de extracción de humedad) a la temperatura de operación. Posteriormente se construye un nuevo gráfico donde se tabula la humedad libre contra tiempo:  $X - X^*$ , donde  $X^*$  es la humedad de la curva de sorción bajo condiciones de secado constante. La pendiente obtenida de la curva es la velocidad de secado que representa la  $\frac{dX}{dt}$  en función del tiempo. Para estimar la velocidad de secado también se puede utilizar la relación:

$$R = -\frac{S dX}{A dt}$$

Donde:

$R$  = velocidad de secado (Kg de agua/s·m<sup>2</sup>)

$S$  = Kg de sólido seco

$A$  = Área de secado (m<sup>2</sup>)

El tiempo de secado del punto B al C que es el más importante del proceso se obtiene utilizando la siguiente relación:

$$t = \frac{S}{AR_C} (X_A - X_C)$$

Hay un método más simple y es utilizando la temperatura de bulbo húmedo, hay que recordar que ya habíamos hecho la observación que la temperatura de bulbo húmedo se utilizaba para estimar la cantidad de vapor que tiene una corriente gaseosa. Para utilizar este valor es necesario suponer que en el proceso solamente hay transferencia de calor de tipo convectivo, es decir, toda la energía está presente en la humedad que se retira del sólido y solo es válido en la etapa de secado constante. A este método se le conoce como método predictivo. Vamos a ver las ecuaciones que podemos utilizar si utilizamos este método para diseñar un proceso de secado. Las variables a utilizar son las siguientes:

$T$  = Temperatura del aire

$T_w$  = Temperatura de bulbo húmedo

$L_w$  = Calor latente de ebullición del agua (J/Kg)



$h$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor

Los coeficientes convectivos de transferencia de calor que se pueden utilizar dependerán del tipo de flujo que se vaya a inyectar al equipo, así:

Para flujo de aire paralelo a la superficie de secado se utilizará:  $h = 0.0204G^{0.8}$

Para flujo perpendicular a la superficie de secado se utilizará:  $h = 1.17G^{0.37}$

Donde  $G = (u)(\rho) = \text{velocidad} \cdot \text{densidad} = \text{Kg de aire/h} \cdot \text{m}^2$

El tiempo de secado durante el periodo a velocidad constante se calcula a través de la relación:

$$t_{Rc} = \frac{SL_W(X_S - X_C)}{Ah(T_0 - T_W)} - \frac{S(X_S - X_C)}{AK_R(W_S - W)}$$

La velocidad de secado puede estimarse por la siguiente relación:

$$t = \frac{h}{L_W}(T_C - T_W)$$

Con las ecuaciones anteriores podemos estimar el tiempo de secado cuando la velocidad es constante pero ¿qué pasa cuando la velocidad decrece?, el tiempo en esta etapa puede estimarse a través de la siguiente relación:

$$t = \frac{S}{A} \int_{X_C}^{X_D} \frac{dX}{R}$$

La estimación también puede hacerse de manera gráfica, para este caso se tiene que construir la curva de velocidad de secado y a partir de esta curva, se hace una nueva gráfica de  $R^{-1}$  en función de  $X$ , posteriormente se estima al área bajo la curva entre los puntos  $X_C$  y  $X_D$  que son las humedades que se están buscando.

Hasta ahora solo nos hemos enfocado en el cálculo de la velocidad y el tiempo de secado pero ¿qué pasa con la transferencia de masa?, indirectamente se estima con la humedad que lleva la corriente gaseosa al final del proceso sin embargo es necesario ir más allá para la comprensión de la operación unitaria de secado. Cuando llegamos a la humedad crítica la velocidad de evaporación del agua presente en la superficie es mayor a la velocidad de migración de agua del interior al exterior del sólido, este hecho hace que se forme un perfil de humedad dentro del sólido y que está directamente relacionado con las



condiciones de secado. Por lo tanto, y esto debe quedar claro, la velocidad de secado depende directamente de la tasa de difusión de agua. La difusividad depende de muchos factores como tipo de material porosidad, temperatura, etc. por lo que su estimación es muy compleja. Generalmente se utiliza el término de difusividad efectiva ( $D_{ef}$ ) que es un promedio de todos los factores que afectan la transferencia de masa. La  $D_{ef}$  se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$$

La  $x$  representa el espesor de la película seca del sólido. Ya existen valores que otros investigadores han estimado mediante experimentación. En la tabla 2 se presentan algunos valores de la difusividad efectiva en varios alimentos. Hay que tomar en cuenta que también la geometría del equipo juega un papel de suma importancia en el diseño de secadores por lo tanto, habrá que tomar en cuenta esta variable ya que no todos los secadores se utilizan para cualquier proceso, de hecho, sería ideal que para cada proceso de secado se diseñara un equipo único, esto no es posible por el costo mismo del diseño, por lo que nos tenemos que acoplar al equipo existente tomando en cuenta las variables de diseño que debe estar descritas.

Alimento	T (°C)	$D_{ef} \times 10^{10} (\text{m}^2/\text{s})$
Espuma de leche entera	50	20
	40	14
	35	8.5
Manzana	66	64
Manzana liofilizada	25	2.43
Papas	54	0.258
	60	0.394
	65.5	0.437
	68.8	0.636
Peras	66	9.63
Carne de res liofilizada	25	0.307
Zanahoria (cubos)	40	0.675
	60	1.21
	80	1.79
	100	2.41

**Tabla 1.** Valores de la difusividad efectiva en varios productos alimenticios. Fuente: Okos *et al.*, (1992)



## 2.3. Aplicaciones

Hasta ahora hemos vistos los conceptos básicos del secado, ahora vamos a estudiar cómo es que se aplican a diversos procesos biotecnológicos. Haremos hincapié, como primer subtema, en los lechos fluidizados que presentan características que hacen únicos a este tipo de procesos, el secado con lechos fluidizados es muy útil para materiales muy sensibles al efecto térmico como por ejemplo la leche. La leche en polvo es un excelente alimento por su alto contenido de proteína, si recordamos lo anteriormente estudiado veríamos que el excederse en el calentamiento de un alimento rico en proteínas podríamos tener a final del secado un alimento con un valor nutricional pésimo por la desnaturalización de proteínas por acción del calor, los secadores de lecho fluidizado resuelven este problema. La producción de leche en polvo consta de dos secados, en el primer proceso se utilizan un ciclón que elimina la mayor parte del agua presente en la leche, posteriormente es transportada a un secador de lecho fluidizado donde termina de secarse, con estos dos procesos se evita la desnaturalización de las proteínas de la leche y de la caramelización de la lactosa. En el siguiente subtema nos enfocaremos al secado de productos biotecnológicos específicos como el secado del café, secado de precursores de vitaminas y de tomate.

### 2.3.1. Secado en lechos fluidizados

El secado utilizando lechos fluidizados es una técnica que se utiliza para eliminar humedad de un sólido o líquido por el paso de una corriente gaseosa caliente a través de ellos. El sólido o líquido se encuentra en el fondo del secador de tal forma que la corriente gaseosa que necesariamente debe ser potente, mantiene flotando a las sustancias a secar. El secado por fluidización consta de varias etapas que se agrupan en secado, enfriamiento, aglomeración, granulación y revestimiento de los materiales en gránulos. Es un proceso en el cual el control de la temperatura es fundamental para un buen secado ya que puede dañar a los productos o generar aglomeración de gránulos que dan mal aspecto al producto final. El gas que se utiliza debe ser un gas seco o con una muy baja humedad y debe abarcar completamente el lecho de secado ya que si no es así, el secado no es uniforme ya que se forman flujos de gas preferenciales a través de todo el tanque de secado. El secado por fluidización es el más utilizado para el secado de gránulos. Debido a que los gránulos son muy pequeños la vaporización de agua del interior del gránulo hacia el exterior es casi instantánea esto permite una mayor velocidad de transporte de materiales, altas velocidades de intercambio de calor con una alta eficiencia térmica y un menor sobrecalentamiento de tal forma que el calor no altera las características fisicoquímicas ni organolépticas del producto final.



Te recomendamos buscar en internet algún esquema de un secado por lecho fluidizado, de secado de gránulos con un secador de lecho fluidizado y de comportamiento típico de un secado por fluidización

Las ecuaciones de diseño para este tipo de secadores son las siguientes:

Velocidad superficial del gas ( $V_0$ ), este valor se estima cuando en la columna o equipo no hay presencia de partículas y se estima por:

$$V_0 = \frac{V}{A_t}$$

Donde:

$V$  = Flujo volumétrico ( $m^3/s$ )

$A_t$  = Área transversal ( $m^2$ )

También es importante estimar la velocidad mínima de fluidización ( $V_{mf}$ ) que se alcanza cuando todas las partículas a secar están en movimiento. Para estimar la  $V_{mf}$  se debe utilizar la ecuación de Ergun para lechos fijos relacionándola con la ecuación de caída de presión:

$$-\Delta P = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho)gL_{mf}$$

Donde:

$\Delta P$  = Caída de presión

$\varepsilon_{mf}$  = Porosidad mínima de fluidización

$\rho_p$  = Densidad de la partícula

$\rho$  = Densidad del gas

$g$  = Gravedad

$L_{mf}$  = Altura mínima del lecho fluidizado

La ecuación de Ergun para lechos fluidizados nos indica que:

$$-\frac{\Delta P}{L_{mf}} = 150 \left( \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon^3} \right) \left( \frac{\mu V_{mf}}{D_p} \right)^2 + 1.75 \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{\rho V_{mf}^2}{D_p} \right)$$

Donde:

$\mu$  = Viscosidad del gas

$D_p$  = Diámetro de la partícula

La velocidad máxima de fluidización ( $V_f$ ) se estima por:



$$V_t = \sqrt{\frac{2(\rho_g - \rho)gD_p}{3f\rho}}$$

Donde:

$f$  = Factor de fricción

Es necesario también estimar:

- La velocidad mínima de burbujeo ( $V_{mb}$ )

$$V_{mb} = K_{mb}ds$$

$K_{mb} = 100 D_s$  que es el diámetro de la superficie de la partícula que se calcula como  $ds = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}$ .

- La velocidad de burbujeo ( $V_b$ )

$$V_b = k(V - V_{mf}) + 0.71\sqrt{gD_b}$$

$k$  = Constante de proporcionalidad;  $D_b$  = diámetro de la burbuja,  $V$  = Velocidad del gas.

El último factor a tomar en cuenta es la porosidad de las partícula, este factor nos da un estimado del espacio vacío en el material, este vacío es el que contiene el agua que queremos eliminar o también puede contener aire. La porosidad está definida por la siguiente relación:

$$\varepsilon = \frac{\text{volumen de huecos}}{\text{volumen total}}$$

o por la relación:

$$\frac{L}{L_m} = \frac{1 - \varepsilon_m}{1 - \varepsilon}$$

$L_m$  = Longitud del lecho

$\varepsilon_m$  = Porosidad a la velocidad mínima de fluidización

Tomando en cuenta el número de Reynolds es posible utilizar diferentes expresiones, si estamos en flujo turbulento, necesariamente se usa la ecuación de ergum, si tenemos flujo laminar se puede utilizar la siguiente ecuación:

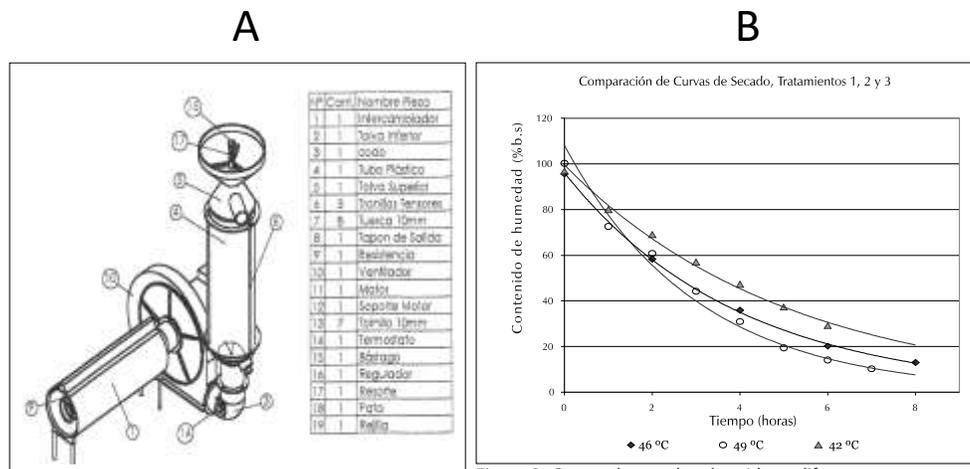
$$V_m = 0.005 \left( \frac{\varepsilon_m^3}{1 - \varepsilon_m} \right) \left( \frac{D_p^2 (\rho_g - \rho) g}{\mu} \right)$$



### 2.3.2. Aplicaciones de secado en sistemas biológicos

Ahora vamos a estudiar algunos casos específicos del secado de varios productos biotecnológicos. Es claro que hay una infinidad de ejemplos utilizados diferentes equipos. Hay que recordar que cada material necesita previamente un proceso de optimización para obtener los resultados deseados. Iniciaremos con el secado del café. Después de la cosecha de la cereza, el café se beneficia por métodos tradicionales posteriormente debe secarse rápidamente para mantener sus propiedades organolépticas. La humedad final del grano debe oscilar de entre un 10 y 12 % bh (base húmeda). El proceso de secado que tradicionalmente se sigue es el secado solar pero el tiempo se prolonga perdiendo muchas características de aroma, un método rápido es el uso de secadores de lecho fluidizado ya que el café puede ser tratado como si fuera una partícula. Estudios realizados por López en 2006 utilizando un secador de lecho fluidizado diseñado por el autor, mostraron que la temperatura de 46 °C resulto ser la mejor ya que mantuvo una excelente homogeneidad de secado del grano de café. El tiempo de secado empleado para alcanzar la humedad de 10-12 % fue de 8 horas. Este proceso mantiene las características sensoriales por lo que se puede concluir que las características organolépticas del producto no se ven alteradas con los secadores de lechos fluidizados. En la figura 10 se muestra el equipo utilizado por el autor y las curvas de secado obtenidas a tres diferentes temperaturas del gas (42, 46 y 49 °C). Otro ejemplo es el secado de frutas utilizando flujos de gas caliente. El secado de frutos es un proceso muy complejo ya que durante el secado hay fenómenos de contracción de los frutos lo que dificulta su secado debido a que el área superficial no se mantiene constante (Dandamrongrak *et al.*, 2002) por lo que se dificulta determinar el periodo de velocidad de secado constante. Hay otros mecanismos involucrados en el secado de frutos como es el transporte capilar, las fuerzas viscosas y la gravedad (Prat, 2002), por esta razones es necesario simplificar los modelos existentes utilizando estudios cinéticos de tal forma que se tenga una mejor comprensión del secado.

Sandoval y otros (2006) realizaron investigaciones para determinar el proceso de secado de plátano utilizando corrientes de gas caliente. Para no afectar las características organolépticas los autores mantuvieron la temperatura constante (60 °C) variando únicamente las velocidades de flujo, por lo tanto estudiaron el efecto de la velocidad de flujo sobre el secado de plátano, es decir, el flujo convectivo. Se utilizó como equipo, un túnel de secado. Los flujos de aire utilizados fueron de 1, 2 y 3 m/s. Observaron que no se distinguía claramente las fases de secado por lo que generaron una estrategia para determinar más claramente el secado de plátano, utilizaron el principio de velocidad de secado reducida que se obtiene a partir del momento en que el producto empieza a encogerse por la pérdida de agua, con esta variación, los autores fueron capaces de construir curvas de secado donde se observan las fases típicas de este proceso.



**Figura 10.** Resultado del secado de café pergamino. En la figura 10A se aprecia el equipo diseñado por el autor y en la figura 10B las curvas de secado a tres diferentes temperaturas. Fuente: López (2006).

Ya hemos hablado de que el control de temperatura es primordial para evitar la degradación de compuestos en productos alimenticios. Antes de secado un producto biológico debemos tener claro el efecto de la temperatura sobre el producto final, por ejemplo, las altas temperaturas hacen que las proteínas presentes en productos de origen animal se vean afectadas. Las proteínas son muy susceptibles a desnaturalización por efectos de calor, una vez desnaturalizadas, no es posible recuperarlas ya que la desnaturalización es un proceso irreversible. La desnaturalización hace que los productos alimenticios pierdan valor nutricional o que presenten sabores y colores desagradables. No solo las proteínas se ven afectadas por efecto de calor, pasa lo mismo con vitaminas, grasas, lípidos, etc. por lo tanto para el secado de productos que sospechamos que contienen este tipo de moléculas debemos hacer estudios previos. Un ejemplo es el efecto del calor sobre las vitaminas que contiene ciertos alimentos, los licopenos son precursores de la vitamina A. Los licopenos tienen actividad anticancerígena de ahí la importancia de consumirlos de manera continua. El jitomate es una fuente muy importante de licopenos, el fruto maduro puede contener de 3 a 12.2 mg/100 g de fruta (Arias *et al.*, 2000). Este compuesto es muy sensible al tratamiento con calor, su degradación trae consigo una importante pérdida en el valor nutricional y en el color.

Para la producción de tomate en polvo generalmente se utiliza el secado por aspersión a una temperatura de 120 y 220 °C. Estas altas temperaturas son necesarias ya que el contenido de agua en el tomate es muy alta (más del 90 %). Para favorecer la formación de polvo de tomate es necesario adicionar coadyuvantes cuya función es la de favorecer la adhesión del tomate seco a este polvo y favorecer el secado. Candelas *et al.* (2005)



realizaron estudios de conservación del licopeno contenido en el tomate durante el proceso de secado por aspersión. Los autores observaron invariablemente una pérdida considerable de licopeno lo que repercutió en el color de soluciones de tomate rehidratado. Dentro de sus principales recomendaciones sugieren utilizar temperaturas más bajas de secado (100 °C a la entrada y 180 °C a la salida) y utilizar coadyuvantes para proteger a este pigmento. ¿Te has dado cuenta que aún cuidando las condiciones de secado no es posible evitar la degradación de ciertos compuestos durante este proceso?. Es importante que antes de que inicies un proceso de secado te documentes lo mejor posible para que determines las mejores condiciones de proceso y no pierdas características nutricionales en el producto final.

## 2.4. Factores físicos que influyen en el secado

Hay otros factores que tiene una marcada influencia en la velocidad de secado que es el tamaño de partícula, la profundidad de los lechos, la eficiencia térmica del proceso y la presión del sistema. En temas anteriores hemos hablado sobre la importancia del tamaño de partícula, entre más pequeña sea la partícula a secar, se tendrá mayor área superficial lo que facilitara el secado, tal es el caso de los procesos de secado por aspersión o lechos fluidizados. La profundidad de lechos para procesos de secado por lechos fluidizados es también importante, entre más grande sea el lecho más difícil será el secado y se invertirá mayor energía en el movimiento de partículas. La eficiencia térmica depende de muchos factores y está relacionada con los puntos anteriores, finalmente, la presión que aunque generalmente no se contempla en el diseño de un proceso puede aplicarse para secado de productos especiales. Recuerda que si bajamos la presión, el punto de ebullición del agua disminuye lo que trae consigo menor afectación al contenido nutricional del producto final.

### 2.4.1. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es fundamental para el secado, el área superficial aumenta si se disminuye el tamaño de partícula. Para el secado por aspersión y por lecho fluidizado, el tamaño de partícula es fundamental. Hay varios métodos para estimar el tamaño de partícula, el más simple es determinando el diámetro de la partícula (Figura 11). El diámetro promedio de las partículas se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$D_p = \frac{1}{\sum_1^i \frac{x_i}{d_{p_i}}}$$



Donde:

$d_p$  = Promedio del diámetro de la partícula

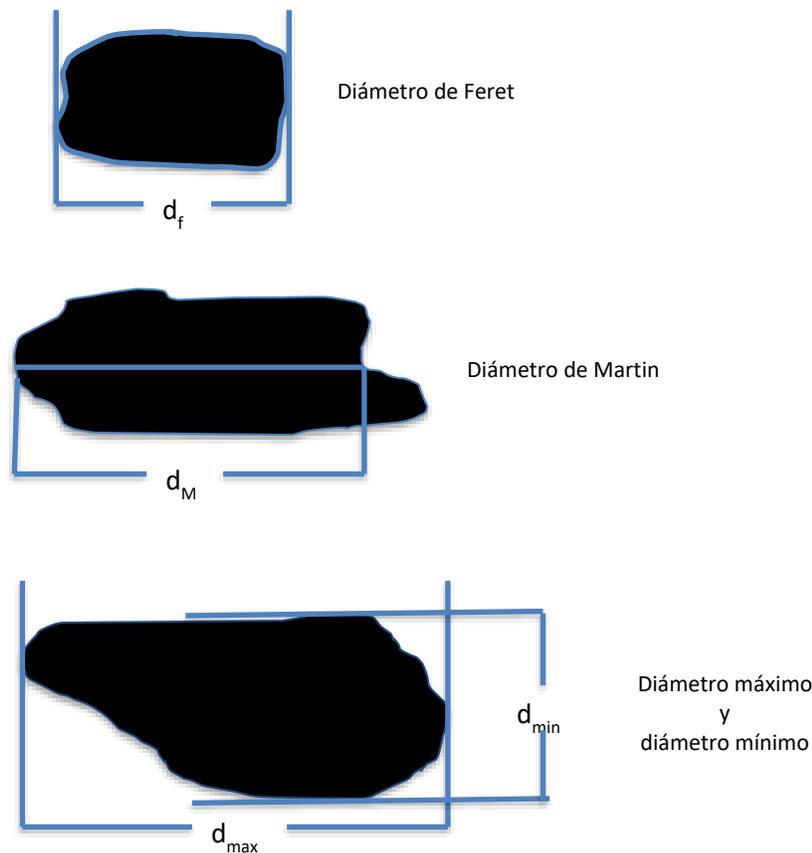
$x_i$  = Peso de las partículas de la muestra

Las partículas también se pueden clasificar en función de su densidad agrupándose en 4 tipos, los de tipo A que son las partículas más pequeñas y ligeras cuyo diámetro esta de entre 20 y 10  $\mu\text{m}$  con una densidad muy baja. Las de tipo B que presentan diámetros promedios de 150  $\mu\text{m}$ . Las de tipo C que tienen diámetros menores a 20  $\mu\text{m}$  y las de tipo D que son partículas mayores a 1000  $\mu\text{m}$ .

La forma también es importante sin embargo, es una variable más difícil de controlar, pero es posible estimar la esfericidad promedio que nos permite estimar que tan esféricas son las partículas de un lecho. La relación que se utiliza es la siguiente:

$$\phi = \frac{\text{área superficial de la esfera cuyo volumen es igual al de la partícula}}{\text{área superficial de la partícula}}$$

Se ha descrito que partículas con menor tamaño presentan menos limitaciones en la transferencia de calor mientras que partículas de mayor tamaño tendrán una menor velocidad de transferencia de calor y como consecuencia, se calentarán menos rápido (Hoyos y Figueroa, 2009).



**Figura 11.** Métodos para determinar el diámetro de una partícula

Una vez que todo el lecho está en movimiento empieza el secado, el flujo de gas envuelve a toda la partícula haciendo más eficiente el secado. El flujo debe mantenerse constante para mantener flotando a todas las partículas del lecho que a su vez se ven afectadas por la fuerza de gravedad que empuja a las partículas hacia abajo, por esto es de suma importancia para secadores de lecho fluidizado que el flujo gaseoso sea lo suficientemente fuerte como para mantener a las partículas flotando sin que haya pérdida de material.

En otros experimentos, se ha observado que hay un intervalo de tamaño de partícula donde la velocidad de secado es óptimo, fuera de este intervalo la velocidad de secado se ve afectada, Reay y Baker (1985) describieron que para partículas de sílica gel, el intervalo de tamaño de partículas donde la velocidad de secado era máxima oscilaba entre 106 a 2247  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, con otros materiales se han observado resultados contradictorios, por ejemplo Reay y Baker (1985) observaron para un fertilizante que la velocidad de secado aumentaba de manera proporcional cuando aumentaba el diámetro



al cuadrado de la partícula. Estos son solo dos ejemplos de cómo el tamaño de partícula es fundamental para el secado, es un hecho que mucho de lo que se sabe del secado se ha obtenido de prueba y error ya que cada material se comporta de manera diferente y no existe un método universal de secado que permita resultados comparables. Por lo tanto, antes de diseñar un método de secado debes averiguar el efecto del tamaño de partícula en el proceso aunado a la porosidad del material que en conjunto, son parte fundamental de la transferencia de calor y de masa.

Te recomendamos buscar en internet imágenes o esquemas de fuerzas que actúan sobre una partícula en un lecho fluidizado y de la clasificación de partícula en función de su densidad y tamaño. Cada curva representa el tipo de partícula.

### 2.4.2. Profundidad de lechos

En el secado por fluidización donde la efectividad del secado depende del tiempo en que las partículas flotan gracias a la aplicación de una corriente gaseosa caliente, la profundidad del lecho es de suma importancia. El lecho como tal se puede comportar de diferente manera en función de variables como velocidad de fluidización, de las propiedades del fluido, de las partículas, la profundidad y el diámetro del lecho. Al inicio del proceso de secado por fluidización, el lecho se mantiene fijo debido a que el flujo debe alcanzar la velocidad mínima de fluidización, cuando todo el lecho tiene movimiento se le conoce como fluidización mínima.

A esta velocidad el secado es muy pobre por lo que necesariamente se debe incrementar la velocidad del gas para que por convección, se acelere la extracción de humedad. Al incrementar la velocidad llegamos al régimen denominado velocidad mínima de burbujeo. Si se sigue incrementando la velocidad del gas se llegan a condiciones en que el material puede salir del equipo y puede considerarse como transporte neumático (Geankoplis, 2011). Bajo condiciones de alta velocidad, se alcanza un secado óptimo. El gasto de energía aplicado para mover el lecho puede ser alto cuando la profundidad del mismo es grande. La profundidad del lecho es directamente proporcional a la velocidad del gas, es decir, entre más profundo sea el lecho, más velocidad del gas se necesitará para moverlo.

Se ha visto que en lechos poco profundos los materiales se secan relativamente rápido, se puede decir que la pérdida de humedad es inversamente proporcional a la profundidad del lecho de secado. Se ha determinado que en la mayoría de los casos el secado de partículas sucede justo en la entrada del gas caliente, esta velocidad va decreciendo conforme aumenta la profundidad del lecho, esto se debe probablemente a que el gas se va saturando de humedad y va perdiendo eficiencia térmica conforme recorre todo el lecho del equipo. En pruebas realizadas por Reay y Baker en 1985 encontraron que para



el secado de partículas de sílica gel la mayor eficiencia de extracción de humedad se alcanzaba a los 20 cm de profundidad del lecho más allá de esta altura, no encontró diferencias significativas en cuanto a la velocidad de secado y en la humedad del gas de salida. Por lo tanto, tomando en cuenta lo anterior se deduce que, en materiales como sílica gel, la cual pierde agua fácilmente, la mayor eficiencia de secado se logra dentro de una distancia corta respecto al distribuidor, y el gas que sale de fase densa esta probablemente cerca del equilibrio con los sólidos; por otro lado, incrementando la profundidad del lecho arriba de la zona de secado no hay incremento significativo en la velocidad de secado.

### 2.4.3. Eficiencia térmica

Otro factor a tomar en cuenta es la eficiencia térmica del proceso. La eficiencia térmica está relacionada con la cantidad de agua que se extrae del sistema, es un hecho que para sólidos con alto contenido de humedad la eficiencia térmica será menor que para sólidos con menor contenido de humedad. La eficiencia térmica se puede definir como la relación entre la cantidad de energía destinada para el procesos de secado por unidad de agua evaporada durante el secado. Con esta definición podemos suponer que para materiales con alto contenido de humedad la efectividad de la eficiencia térmica es menos que para materiales con bajo contenido de humedad. La eficiencia térmica tendrá por lo tanto, un efecto directo sobre el tiempo de secado además de una mayor inversión de energía debido a que se necesitará más vapor para la extracción de la humedad.

El consumo de energía por unidad de agua evaporada depende de varios parámetros, los más importantes son: la variación de la humedad del producto durante el secado (velocidad de secado), las condiciones ambientales (como humedad relativa) y el tipo de secador empleado. Cada tipo de secador tiene una eficiencia térmica de finida.

La velocidad de secado de los sólidos a su vez depende de la temperatura y del flujo de gas de secado, del contenido de humedad inicial y de equilibrio de los sólidos y en el caso de secadores de lechos fluidizados, dependerá del movimiento de las partículas dentro del lecho.

Cada tipo de secadores ejerce gran influencia sobre el rendimiento térmico de secado. Cada producto como o ya lo hemos visto, se seca a una velocidad diferente y cada uno presenta exigencias más o menos precisas respecto a la calidad. Por lo tanto, antes de someter un sólido a secado debemos investigar sobre sus propiedades fisicoquímicas y de las características del equipo que vayamos a utilizar ya que como ya lo hemos mencionado, cada sólido es diferente, este problema se ve aumentado con productos biológicos que pueden ver sus características organolépticas afectadas por un deficiente sistema de secado.



La eficiencia térmica se puede estimar con respecto al calor total entregado por el vapor de la camisa (Triana *et al.*, 2011):

$$\eta_T = \frac{Q}{Q + Q_P} * 100 \%$$

Donde:  $\eta_T$  es la eficiencia térmica en %,  $Q$  es el calor entregado por el medio de calentamiento al sólido secado,  $Q_P$  es la pérdida neta de calor (calor que no se aprovecha en el secado). La eficiencia térmica también se puede estimar a partir de las entalpías del sistema, si este es el caso, la eficiencia térmica es:

$$\eta_T = \frac{S_{S2}(H'_{S2} - H'_{S1}) + V_2 \Delta H'_{vap}}{m_C \Delta H'_{cond}} * 100 \%$$

Donde  $S_{S2}$  es el flujo sólido seco a la salida,  $H'_{S2}$  es la entalpía del sólido húmedo a la salida,  $H'_{S1}$  entalpía del sólido a la entrada,  $V_2$  flujo de vapor de agua a la salida,  $m_C$  es el flujo de condensado y  $\Delta H'_{vap}$  entalpía de vaporización.

#### 2.4.4. Efecto de la presión

La presión es de suma importancia en los procesos de secado, en el secado por fluidización un material empieza a **expandirse** cuando hay diferencias en las presiones tanto del interior como en el gas de secado. La diferencia de presiones hace que el sólido empiece a expandirse permitiendo la salida de la humedad. Si se analiza la caída de presión en todo el lecho se observaría que esta va aumentando conforme aumenta la velocidad de secado y el efecto se observa a lo largo del lecho hasta que todas las partículas están en movimiento.

Posteriormente, la caída de presión se mantiene constante y es cuando se presenta el secado. El único problema sería que si se aumenta demasiado la velocidad de flujo de la corriente gaseosa se puede correr el riesgo de pérdida de material. Al relacionar caída de presión con velocidad de flujo observaríamos que hay una etapa donde se observa un aumento en la caída de presión y que es proporcional a la velocidad de flujo (recta A-B). En esta etapa es cuando el lecho empieza a adquirir movimiento, una vez que todo el lecho esta en movimiento, la caída de presión se mantiene constante (recta BCD) y la velocidad de secado es constante, si se disminuyera la velocidad de flujo se observaría un



comportamiento contrario es decir, se presenta una disminución de la caída de presión.

La caída de presión se puede estimar con la siguiente expresión:

$$\Delta PA = \frac{m}{\rho_P} (\rho_P - \rho) g$$

Donde:

$m$  = masa de las partículas

$A$  = Área del lecho

$\rho_P$  = Densidad de las partículas

$\rho$  = Densidad del fluido

En **lechos fluidizados** con gas se pueden eliminar las densidades por ser valores muy pequeños, bajo estas circunstancias la caída de presión se puede estimar a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta PA = mg$$

Cuando el equipo no presenta canales, la ecuación anterior se puede simplificar aún más que dando solo en función de la longitud del lecho:

$$\Delta P = (1 - \varepsilon) g \rho_P L$$

Te recomendamos buscar en internet imágenes o esquemas del dumento de la caída de presión a lo largo de un lecho fluidizado y de alguna comparación de la caída de presión con la velocidad de flujo.

## 2.5. Equipos de secado

Vamos a concluir la unidad de secado estudiando tres configuraciones de equipo de secado más comunes en la industria biotecnológica. Empezaremos hablando de evaporadores, de su eficiencia y de las configuraciones que nos podemos encontrar, hay que recordar que los evaporadores son quizás los equipos más utilizados en la industria de los alimentos ya que son imprescindibles para la concentración de líquidos como leches, bebidas, mermeladas, etc. posteriormente hablaremos de los ciclones que son equipos que se utilizan para el secado de sustancias muy sensibles al daño por calor como son materiales ricos en proteínas, vitaminas y carbohidratos como leches, alimentos en polvo y bebidas deshidratadas. Terminaremos hablando de los secadores solares que



por su diseño, son muy baratos y muy eficientes si nos referimos al ahorro de energía. Es común su uso para el secado de frutos y de granos.

### 2.5.1. Evaporadores

Vamos a empezar hablando de los tipos de evaporadores disponibles en la industria biotecnológica. Cada evaporador tiene aplicaciones específicas de aplicación. Los evaporadores los podemos clasificar como evaporadores de película descendente, de película ascendente y de circulación forzada. Los evaporadores de película descendente son de los equipos más comúnmente utilizados en la industria biotecnológica y de los alimentos, estos equipos presenta alta eficiencia térmica, son económicos, presentan altos rendimientos en el secado, tiene alta flexibilidad lo que implica que se pueden adecuar a una gran variedad de procesos, presentan altos coeficientes de transferencia **de calor** y debido a su versatilidad se pueden utilizar al secado de productor termolábiles. Los evaporadores de película descendente se les llama así porque generalmente el líquido a concentrar entra por la parte superior del equipo, posteriormente, el líquido al entrar en contacto con los tubos que llevan en su interior vapor sobrecalentado inmediatamente empieza el proceso de evaporación. El vapor generado se envía a un condensador para nuevamente ser recirculado en forma de vapor. Cuando solo se tiene un evaporador se dice que se tiene un equipo de efecto simple. Al colocar en línea más evaporadores se pueden tener más efectos y hacer más eficiente la evaporación de agua. Como ejemplo, en un evaporador de efecto simple por cada Kg de vapor aplicado se obtiene un Kg de agua evaporada, en un evaporador de doble efecto, por cada Kg de vapor aplicado se obtiene dos Kg de agua evaporada, esto implica que se duplica el rendimiento.

Los evaporadores de múltiple efecto son más eficientes en la evaporación debido a que el gas se recircula por cada uno de evaporadores siendo energéticamente más eficientes. Una mejora para este tipo de secadores es colocar un termocompresor cuya función es comprimir el vapor sobrecalentado a alta presión el cual al ser liberado aumenta significativamente el poder calorífico haciendo aún más eficientes a estos secadores.

Por lo tanto, el reuso del vapor permite un ahorro extraordinario de energía tanto en el proceso como en el costo final del producto secado.

No hay límite en lo referente a configuraciones de evaporadores, las necesidades de evaporación serán las que realmente definan el número de efectos hasta obtener el producto deseado.



En los evaporadores de flujo ascendente la alimentación se hace por la parte inferior del equipo, el líquido al entrar en contacto con los tubos que llevan en su interior el gas sobrecalentado empieza a concentrarse. En la parte inferior del equipo empieza a formarse el vapor y conforme el líquido concentrado avanza hacia la parte superior del evaporador aumenta la presión generándose un flujo turbulento que hace mas eficiente la transferencia de calor. En esto equipos es posible recircular el líquido para una concentración más eficiente.

Finalmente tenemos a los evaporadores de circulación forzada. Estos equipos no suelen ser económicos pero en ocasiones son la única opción que tenemos sobre todo cuando trabajamos con líquidos con altas viscosidades, con líquidos que presentan precipitación o cristalización, con líquidos que forman incrustaciones o con líquidos con características térmicas que imposibilitan una circulación natural. En estos equipos primero el líquido a concentrar es precalentado para disminuir su viscosidad, posteriormente es forzado a pasar a un separador donde nuevamente sufre un sobrecalentamiento produciéndose una evaporación flash. La velocidad de circulación del líquido dentro del separador es el factor que realmente controla la evaporación de agua.

Te recomendamos buscar en internet imágenes de evaporadores de efecto simple, de efecto triple, de flujo ascendente y de circulación forzada, además de un sistema de evaporación de 4 efectos para la destilación de agua a partir de agua salada, esquemas o imágenes de la eficiencia de evaporadores equipados con termocompresores y del consumo de vapor en función de diferentes efectos de evaporación.

### 2.5.2. Ciclones

Los secadores por ciclones se utilizan cuando se requiere secar productos con alta cantidad de humedad libre y que además son muy sensibles a alta temperatura. El sólido es atomizado dentro de una cámara donde circula aire a alta temperatura produciendo un secado en cuestión de segundos. La velocidad llega a ser tan alta que el mismo aire es utilizado como medio de transporte. Un factor importante es que como el sólido a secar contiene alta humedad al entrar en contacto con el aire caliente, este último se enfría evitando altas temperaturas en el secado. También es importante señalar que los flujos convectivos son de suma importancia para mejorar la eficiencia de secado. Este tipo de equipos es utilizado para secar productos alimenticios, productos químicos, polímeros, minerales, masas, gránulos, hojuelas, geles y pastas.

Las ecuaciones de diseño para un secador de ciclos y específicamente para el secado de productos agroalimentarios fueron descritas por Gómez y Ochoa (2012) utilizando como modelo zanahoria. Estas ecuaciones se muestran a continuación:



$$SMER \text{ (velocidad específica de extracción de calor)} = \frac{\text{cantidad de agua evaporada}}{\text{energía de entrada al secador}}$$

$$DE \text{ (eficiencia de secado)} = \frac{T_{\text{aire entrada}} - T_{\text{aire salida}}}{T_{\text{aire entrada}} - T_{\text{aire saturado}}} * 100$$

$$\sum E_{xL} \text{ (pérdida de energía)} = \sum E_{xi} - \sum E_{x0}$$

$$\eta_{E_x} \text{ (eficiencia energética)} = \left( 1 - \frac{E_{x\text{salida}}}{E_{x\text{entrada}}} \right) * 100$$

Una variación importante que mejora el secado es la inyección del sólido a secar en solución a altas presiones de tal forma que se forma una nube con micropartículas que son eficientemente secadas por el flujo convectivo. A este tipo de secadores se les conoce como **secadores de aspersion** que en realidad son un proceso derivado de los secadores de ciclón.

Te recomendamos buscar en internet imágenes o esquemas de un secador de ciclón, de las diferentes configuraciones de secadores por aspersion y del funcionamiento de un secador solar.

### 2.5.3. Solares

Como último tema vamos a hablar de los secadores solares. Este tipo de equipo es muy económico y térmicamente son muy eficientes, su única fuente de energía la obtiene de los rayos solares por lo que al construir un secador solar nos debemos asegurar que la zona de absorción de la energía sea capaz de absorber la mayor cantidad de calor. Generalmente el colector solar está construido de una lámina metálica pintada de color oscuro. El principio de funcionamiento es muy simple, el colector solar calienta el aire adyacente provocando que este aire circule hacia la parte superior del equipo por la baja densidad generando flujos convectivos que son, junto a la temperatura del aire, el responsable del secado del material.



Los secadores solares se clasifican en tres clases, los **secadores tipo carpa** que son secadores sencillos, son compactos, livianos y de fácil transportación. En este tipo de equipos, el calentamiento se hace a través de un colector solar colocado en la parte inferior del secador y por convección se seca el producto que está por arriba del colector solar. El posible problema de este equipo es el escurrimiento del material sobre el colector solar. El otro tipo de secadores son los **secadores solares tipo armario**. Este equipo consiste de un colector solar inclinado unido a una cámara de secado que es donde se coloca el producto a secar. Se genera un flujo convectivo que circula por la cámara de secado. Algunos equipos tienen un extractor cuya función es extraer el gas húmedo para mejorar el secado dentro de la cámara. Estos equipos pueden alcanzar temperaturas de 25 a 30 °C superiores a la del ambiente. El último tipo de secador es el **secador solar tipo túnel**. Estos equipos son utilizados para procesos de secado semi-industrial. El túnel de secado de estos equipos está alternado con colectores de secado y parrillas de secado para asegurar un secado más homogéneo. Algunos equipos tienen ya sea un ventilador en el principio del túnel para forzar el flujo de aire, otros tienen un extractor al final del túnel con el mismo fin. La temperatura que alcanzan los secadores de túnel es de 20 a 25 °C por arriba de la temperatura ambiente.

La construcción de estos equipos es muy sencilla y no se requiere de muchos conocimientos técnicos. Lo único que se debe cuidar es que el colector solar reciba el mayor tiempo posible los rayos solares. Un problema es que no se puede manejar un flujo constante de gas caliente debido a que el equipo está a expensas de los rayos solares. Tampoco se tiene control de la temperatura de la corriente de gas caliente lo que provoca que cuando hay más incidencia de rayos solares, el gas alcanza la temperatura máxima y va variando conforme pasan las horas del día. Sin embargo, este tipo de equipo es una excelente opción cuando el producto a secar no exige condiciones controladas de secado, como en el caso de frutos.

Las ecuaciones de diseño de secadores solares son muy variables ya que dependen de la geometría, tamaño y producto a secar. Venegas y Parra (2011) proponen las siguientes ecuaciones para el secado de materiales porosos como pueden ser frutos. Para estimar el coeficiente de transferencia de calor de película utilizaron la siguiente ecuación:

$$h_c = 0.0204G^{0.8}$$

Donde G es la velocidad de flujo másico. Para estimar la velocidad de secado en la fase de velocidad constante se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_C = \frac{h_c}{\lambda_{Tbh}} (T_E - T_{bh})$$



Donde  $\lambda_{Tbh}$  es el calor latente de vaporización a la temperatura del bulbo húmedo,  $T_E$  es la temperatura del aire a la entrada del secador y  $T_{bh}$  es la temperatura de bulbo húmedo. La velocidad total de evaporación de agua es calculada por medio de la siguiente expresión:

$$R_{CTOTAL} = R_C S_S$$

Donde  $S_S$  es la superficie de secado. La longitud del secador se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$L_S = NUT * LUT$$

Donde  $NUT = \frac{T_{aes} - T_{ss}}{\Delta T_m}$ , donde  $T_{aes}$  es la temperatura del aire a la entrada del secador,  $T_{ss}$  es la temperatura del sólido a la salida del secador y  $\Delta T_m$  es la diferencia de la media logarítmica de la temperatura. LUT (longitud de la unidad de transferencia) se estima por la relación  $LUT = \frac{G * C_P}{h_C * a}$  ( $C_P$  es el calor específico del aire y  $a$  es el área de contacto).

Te recomendamos buscar en internet imágenes o esquemas de tipos de secadores solares, tipo carpa, tipo anaquel, tipo túnel y de los pasos de fabricación de un secador solar tipo anaquel

## Actividades

La elaboración de las actividades estará guiada por tu docente en línea, mismo que te indicará, a través de la Planeación didáctica del docente en línea, la dinámica que tú y tus compañeros (as) llevarán a cabo, así como los envíos que tendrán que realizar.

Para el envío de tus trabajos usarás la siguiente nomenclatura: BOU2\_U2\_A1\_XXYZ, donde BOU2 corresponde a las siglas de la asignatura, U2 es la etapa de conocimiento, A1 es el número de actividad, el cual debes sustituir considerando la actividad que se realices, XX son las primeras letras de tu nombre, Y la primera letra de tu apellido paterno y Z la primera letra de tu apellido materno.



## Autorreflexiones

Para la parte de **autorreflexiones** debes responder las *Preguntas de Autorreflexión* indicadas por tu docente en línea y enviar tu archivo. Cabe recordar que esta actividad tiene una ponderación del 10% de tu evaluación.

Para el envío de tu autorreflexión utiliza la siguiente nomenclatura: BOU2\_U2\_ATR\_XXYZ, donde BOU2 corresponde a las siglas de la asignatura, U2 es la unidad de conocimiento, XX son las primeras letras de tu nombre, y la primera letra de tu apellido paterno y Z la primera letra de tu apellido materno

## Cierre de la unidad

Has concluido la segunda unidad de la asignatura de Operaciones unitarias II. Esperamos que hayas aprendido los conceptos básicos del proceso de secado y sobre todo, que llegues a aplicar tales conceptos. Lo más importante de la unidad es que aprendiste que cada material que vaya a ser sometido a secado debe ser estudiado previamente para que las condiciones de secado no vayan a afectar sus características organolépticas (si se trata de un producto biológico). Pasaremos a la última unidad, en la que se abordarán temas como la cromatografía, sus métodos, sus usos y con ello concluiremos la asignatura. Mucho ánimo, ya estamos en la etapa final.



## Para saber más



Arias, R., Lee, T. C., Logendra, L., Janes, H. (2000). Correlation of lycopene measured by HPLC with the L, a, b color reading of hidroponic tomato and the relationship of maturity with color and lycopene content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48: 1697-1702.

En este artículo de investigación se hace un estudio de los principales constituyentes del jugo de tomate así como su composición y variación durante la maduración del fruto.

Bird, R. B. (1980). Fenómenos de transporte. 3ra. Edición. México: Limusa Wiley.  
Es un libro clásico de fenómenos de transporte. En el capítulo 5 se hace un estudio sobre la transferencia de calor en diferentes sistemas, lo que permitirá una mejor comprensión del proceso de secado.

Candelas, C.M.G., Alanís, G.M.G.J., Bautista, J.M., Del Río, O.F., García, D.C. (2005). Contenido de licopeno en jugo de tomate secado por aspersión. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 4(3): 299-307.

En este artículo se hace un estudio del efecto de las variables del secado sobre las características organolépticas del tomate haciendo énfasis sobre licopenos.

Carbonell, J.V., Madarro, A., Piñaga, F., Peña, J.L. (1984). Deshidratación de frutas y hortalizas con aire ambiente. IV. Cinética de adsorción y desorción de agua en zanahorias. *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.* 24(1): 94-103.

Los autores de este artículo hacen un estudio muy interesante del comportamiento de diversos frutos durante el secado utilizando procesos naturales como exposición solar y convección natural.



Geankoplis, C.J. (2011). Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4ta. Edición. Grupo Patria Cultural. México.

Es un libro donde se encontrarán fundamentos básicos de los fenómenos de transporte. En el capítulo 9 se estudian los principios básicos del secado.

Gómez, D.J.C., Ochoa, M.C.I. (2012). Secador asistido por bomba de calor y secador convectivo con recirculación total: alternativas para el secado de materiales agroalimentarios. *Vitae*. 19(1): S36-S38.

En este artículo de investigación se hace un estudio del proceso de secado convectivo, además se proponen equipos para el secado de productos biológicos.

McCabe, W.L. (2007). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 7ma. Ed. McGraw-Hill/Interamericana, México.

En el capítulo 24 de este libro, se estudia el secado de materiales sólidos, en donde se exponen las principales variables físicas involucradas en este proceso.

Okos, M.R., Narsimham, G., Singh, R.K., Weitnauer, A.C. (1992). Food dehydration. En *Handbook of Food Engineering*. D.R. Helman y D.B. Lun (eds). Marcel Dekker, New York.

En este manual se pueden encontrar diferentes tablas necesarias para el diseño de equipo de secado e información fundamental del secado de materiales biológicos.

Perry, R., Green, D. Maloney, L. Manual del Ingeniero Químico. 6ta. Ed. McGraw-Hill, México.

Es un manual fundamental para la solución de problemas de transferencia de calor. En este manual se puede encontrar información sobre diferentes materiales y variables fisicoquímicas.

Reay, D., Baker, C.G.J. (1985). Drying. Davidson, JF; Clift, R; Harrison, D. *Fluidization*. 2, 529-562.

En este libro se hace un estudio muy interesante del secado y los diferentes equipos para procesos tanto químicos como biológicos.

Thompson, E.V., Ceckler, W.H. (1977). Introduction to chemical engineering. 1er. Ed. McGraw-Hill. New York.

En este libro se encontrará información referente a los diversos fenómenos que se presentan durante el secado y de procesos paralelos como equipos de transferencia de calor.



Triana, M.A., Ayala, M.A., de la Puente, F., Camargo, R.A. (2011). Grado de secado y eficiencia térmica de un secador de tornillo transportador drying. DYNA. 78(165): 196-206.

Es este artículo de investigación se hace un estudio de la eficiencia térmica del proceso de secado de un equipo de tornillo proponiendo diversas ecuaciones matemáticas que es posible aplicar a procesos similares.

Venegas, M.P., Parra, C.A. (2011). Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de secador dinámico para la obtención de pulpas de frutas deshidratadas laminadas. Ingeniería e Investigación. 31(1): 163-170.

Los autores, en este artículo, proponen ecuaciones para el diseño de equipos de secado solar donde toman en cuenta diversas variables como intensidad solar, velocidad de flujo, etc., para productos biológicos.

### Fuentes de consulta



Candelas, C.M.G., Alanís, G.M.G.J., Bautista, J.M., Del Río, O.,F., García, D.C. (2005). Contenido de licopeno en jugo de tomate secado por aspersion. Revista mexicana de Ingeniería Química.

Durango, N., Bula, A., Moreno, Y., Pérez, H. (2005). Análisis y caracterización de las variables que inciden en el proceso de secado artificial de yuca en un modelo de secador de flujo radial. Ingeniería y Desarrollo.

Geankoplis, C.J. (2011). Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4ta. Edición. Grupo Patria Cultural. México.



Hernández, R.J., Quinto, D.P. (2005). Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. Científica.

Hernández, R.J., Martínez, O.V., Quinto, D.P., Cuevas, D.J., Acosta, O.R., Aguilar, J.O. (2010). Secado de chile habanero con energía solar. Revista iberoamericana de Tecnología Postcosecha.

Hoyos, L.J., Figueroa, D.R. (2009). Efecto del tamaño de partícula y de la temperatura de secado en la pirolisis a la velocidad media de aserrín. Memorias del IV Simposio de Química Aplicada. Armenia, Colombia.

López F.E.M. (2006). Secado de café en lecho fluidizado. Ingeniería e Investigación.

Quintana, H.P.A., Poot, A.L.E., Martínez, G.G.M., Castro, M.A.J. (2006). Escalamiento del proceso de secado de bagazo de caña. Revista Mexicana de Ingeniería Química.

Sandoval, T.S., Rodríguez, R.J., Méndez, L.L., Sánchez, R.J. (2006). Rapidez de secado reducida: una aplicación al secado convectivo de plátano Roatán. Revista Mexicana de Ingeniería Química.

Siche, R., Rodríguez, H., Arteaga, H., Seijas, S., Ortega, E. (2009). Diseño de un secador de bandejas prototipo que opera con briquetas de carbón (antracita). Universidad Estadual de Campinas.