

29.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO TECNICO ECONOMICO DEL SECADO EN EL PROCESO DE OBTENCION DE HARINA DE CEMPASUCHIL

TESIS MANCOMUNADA QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERA QUIMICA INGENIERO QUIMICO PRESENTAN: AGUIRRE LOPEZ VIRIDIANA CORREA CASTELLANOS ISRAEL



MEXICO, D. F.

EXAMENES PROFESIONALES: 1998 FAC. DE QUIMICA

264450

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente Prof. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

Vocal Prof. Emilio M. Pradal Roa

Secretario Prof. María Luisa Galicia Pineda

Primèr suplente Prof. Carlos Galdeano Bienzobas

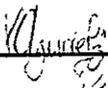
Segundo suplente Prof. Rodolfo Torres Barrera

Sitio donde se desarrolló el tema:

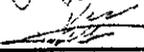
PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. Labs. 301-303, Edificio E-3  
Laboratorio de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM

Nombre y firma de los sustentantes

Viridiana Aguirre López



---



---

Israel Correa Castellanos

Nombre y firma del asesor del tema

María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa



---

Nombre y firma del supervisor técnico

Genovevo Silva Pichardo



---

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la Dra. Carmen Durán de Bazúa por haber revisado ésta tesis y por el sinnúmero de mejoras y formas de clasificar los conceptos para la lectura del presente trabajo.**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Química por esos momentos tan especiales que vivimos en ella.**

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
LISTA DE ABREVIATURAS	
RESUMEN	1
<b>CAPÍTULO 1. GENERALIDADES</b>	
1.1 Introducción	3
1.2 Antecedentes e importancia del proceso	4
<b>CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE HARINA DE CEMPASÚCHIL</b>	
2.1 Descripción del proceso	6
2.2 Operaciones del proceso	7
2.3 Diagrama de flujo de proceso	8
2.4 Análisis del problema de la generación de efluentes en el proceso	9
<b>CAPÍTULO 3. SECADO</b>	
3.1 Generalidades del secado	11
3.2 Períodos del secado	12
3.2.1 Períodos de velocidad constante	14
3.2.2 Períodos de velocidad decreciente	14
3.3 Mecanismo de transferencia de masa dentro del sólido	15
3.3.1 Mecanismo de transferencia por difusión	15
3.3.2 Mecanismo de transferencia por capilaridad	16
3.3.3 Efecto de contracción	16
3.4 Clasificación de secadores	16
<b>CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE SECADO</b>	
4.1 Determinación experimental de la humedad crítica y curvas de secado	22
4.2 Acondicionamiento del secador	22
4.3 Descripción del experimento	23
4.3.1 Diseño del experimento	23
4.3.2 Materia prima	23
4.3.3 Equipo utilizado	23
4.4 Pruebas de secado	23
4.5 Curvas de velocidad de secado	28
4.6 Resultados experimentales	28

<b>CAPÍTULO 5. SELECCIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL SECADOR</b>	<b>Página</b>
5.1 Selección preliminar técnica	41
5.1.1 Criterios de selección y comparación de secadores	42
5.2 Descripción de los secadores preseleccionados	46
5.2.1 Secador neumático	46
5.2.2 Secador continuo de bandejas	47
5.2.3 Secador rotatorio continuo	50
5.2.4 Secador de banda	51
5.2.5 Secador de lecho fluidificado	52
5.3 Diagrama de flujo del proyecto	54
5.3.1 Cálculo del secador neumático	55
5.4 Elección de los modelos de los equipos	65
5.5 Evaluación económica	66
5.6 Condensado de resultados	74
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>77</b>
<b>APÉNDICE A</b>	<b>79</b>

## **LISTA DE TABLAS**

	<b>Página</b>
1.1 Producción de cempasúchil por año agrícola	5
1.2 Producción de cempasúchil por entidad federativa y forma de cultivo	5
2.1 Rendimiento promedio del cultivo de cempasúchil por hectárea	7
2.2 Características de las aguas del ensilado y prensado de cempasúchil	9
3.4.1 Clasificación de secadores por escala de producción	17
3.4.2 Clasificación de secadores por su método de operación	18, 19
3.4.3 Clasificación de secadores con base en la forma física de la alimentación	20
3.4.4 Clasificación de los secadores con base en las características fisicoquímicas o de presentación del producto	21
4.1 Lecturas promedio de las condiciones de operación del secador en la experimentación	24
4.2 Valores de la velocidad de secado en la prueba 1	25
4.3 Valores de la velocidad de secado en la prueba 2	26
4.4 Valores de la velocidad de secado en la prueba 3	27
4.5 Valores de la velocidad de secado en la prueba 4	27
4.6 Valores experimentales finales	28
5.1 Características del proceso de obtención de harina de cempasúchil	43
5.2 Tabla matriz	45
5.3 Variables específicas del secado en diferentes tipo de secadores	53

5.4	Datos específicos del proceso	55
5.5.1	Monto total de la inversión	67
5.5.2	Presupuesto del costo de operación	68
5.5.3	Concentraciones máximas que exceden las permisibles	69
5.5.4	Resultados económicos de la operación del sistema de secado del cempasúchil	71
5.5.5	Flujo neto de efectivo	71
5.5.6	Período de recuperación de la inversión a valor presente	74

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagramas de bloques y balances de masa para una planta deshidratadora de cempasúchil en México	8
3.2.1	Contenido de humedad en función del tiempo	12
3.2.2	Velocidad de secado en función del contenido de humedad	13
3.2.3	Velocidad de secado en función del tiempo	13
4.1	Diagrama del secador de charolas tipo túnel empleado en la determinación de la humedad crítica de la flor conocida como cempasúchil	24
4.2	Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado. Prueba 1	30
4.3	Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado. Prueba 2	31
4.4	Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado. Prueba 3	31
4.5	Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado. Prueba 4	33
4.6	Curva de secado. Velocidad de secado en función del tiempo de secado. Prueba 1	34
4.7	Curva de secado. Velocidad de secado en función del tiempo de secado. Prueba 2	35
4.8	Curva de secado. Velocidad de secado en función del tiempo de secado. Prueba 3	36
4.9	Curva de secado. Velocidad de secado en función de la humedad libre. Prueba 1	37
4.10	Curva de secado. Velocidad de secado en función de la humedad libre. Prueba 2	38
4.11	Curva de secado. Velocidad de secado en función de la humedad libre. Prueba 3	39
4.12	Curva de secado. Velocidad de secado en función de la humedad libre. Prueba 4	40
5.1	Diagramas de bloques y balances de masa para el proyecto de sustitución de las operaciones de ensilado y prensado por la de secado en una planta deshidratadora de cempasúchil en México	54

## Lista de abreviaturas

A= superficie de radiación, m<sup>2</sup>  
C<sub>pagua flor</sub>= calor específico de agua, de la flor, kJ/kg°C  
Delta t = diferencia de tiempos, h  
Delta X = diferencia de humedades  
DBO= demanda bioquímica de oxígeno soluble a cinco días  
DQB= demanda química de oxígeno soluble/total  
FD= flujo descontado  
FDA= flujo de efectivo descontado acumulado  
Pt= fosforo total  
PRIV= período de recuperación de la inversión a valor presente  
Q= calor, kJ/h  
R = velocidad de secado, kg H<sub>2</sub>O/h m<sup>2</sup>  
SS = sólidos secos, kg  
SST= sólidos secos totales  
TBS= temperatura de bulbo seco, °C  
TBH= temperatura de bulbo húmedo, °C  
To= temperatura ambiente del aire, °C  
T1= temperatura de los gases que entran al horno, °C  
T2= temperatura de la salida de los gases, °C  
T3= temperatura exterior del secador, °C  
Tw1= temperatura de bulbo húmedo del aire en la entrada, °C  
Tw2= temperatura de bulbo húmedo de los gases de salida, °C  
X<sub>t</sub> = humedad en base seca, kg H<sub>2</sub>O/kgSS  
X = contenido de humedad, kg agua  
W<sub>t</sub> = peso de las charolas con el cempasúchil, kg  
W<sub>flor</sub> = peso de la flor, kg  
W<sub>p</sub>= sólidos húmedos a la salida del secador neumático, kg  
W<sub>s</sub>= peso del sólido seco

## RESUMEN

Se sabe que el proceso más usado en México para deshidratar cempasúchil o flor de muerto (llamada así porque es ampliamente utilizada en los altares y ofrendas con que se rinde culto a los muertos en México), tiene dos operaciones (ensilado y prensado) que generan aguas residuales con altas concentraciones de material orgánico disuelto. En este trabajo se estudió técnica y económicamente el secado directo del para evitar esos vertimientos de efluentes altamente contaminantes, que no cumplen con la normatividad vigente en México. El cempasúchil o flor de muchos pétalos (del náhuatl *cempoalli* veinte y *xóchitl*, flor) es una fuente natural de carotenoides, colorantes de gran importancia como aditivos en las elaboraciones industriales de alimentos a gran escala. Un ejemplo se encuentra en el ramo avícola, el cual adquiere directamente la harina para ser usada como aditivo de los alimentos balanceados de pollo de engorda y gallinas ponedoras para aumentar la pigmentación de piel y músculo en los pollos y de la yema en los huevos. Tomando como base 12.5 toneladas de flor fresca y obteniendo 5 toneladas por hora de torta húmeda para enviar a un segundo secador ya existente y usando un secador neumático (que requiere de una inversión de \$ 3,917,000, a pesos mexicanos de abril de 1998, con una tasa de cambio de \$8.30 pesos por cada dólar americano), se tendrá una tasa interna de retorno del 27.75% al considerar los gastos por arrojar aguas residuales al entorno como el factor de ahorro de gastos. Esta tasa interna de retorno da un período de recuperación de la inversión de 6.85 años. Comparando el secador directo con la instalación de una planta de tratamiento para las aguas residuales, la tecnología más limpia es mejor ya que la tasa interna de retorno es de 26.81% (para una planta de tratamiento que solamente depura hasta un 80% el contenido de materia orgánica).

## ABSTRACT

The most commonly used process in Mexico for the dehydration of cempasúchil or deads day flower (known by this name because is widely used in the altars and offerings to celebrate the family dead people on November 1 and 2, a pre-Columbian custom in Mexico), has two unit operations (silage and pressing) that generate wastewaters with very high concentrations of dissolved organic material. In this work, it was studied a direct process of drying the flower to assess its economic and technical feasibility when compared with the treatment of these effluents that do not comply with the Mexican regulations on wastewater dumping into rivers and soils. Cempasúchil or many petals flower, that would be its Aztec name (from Náhuatl language *cempoalli*, twenty and *xóchitl*, flower) is a natural source for carotenoids, natural pigments of great importance as additives for the food industry. An example in the feedstuffs industry is its use as a flour for broilers and egg producing hens. The addition of cempasúchil flour to the feedlots increases the yellow pigmentation of skin and muscle in the broilers and of the egg yolks in the eggs. Taking as a calculation basis 12.5 tons of fresh flowers and obtaining 5 tons per hour of moist cake to be sent to the existing drier in most flour factories, the evaluation of a pneumatic drier (requiring an initial capital investment of \$3,917,000 Mexican Pesos at April 1998 currency value of \$8.30 per 1 US Dollar), a rate of recovery of the initial capital investments of 27.75% considering the costs of dumping the wastewaters into the environment without further treatment. This rate of return gives a recovery time of 6.85 years. Comparing the direct drying process with the installation of a wastewater treatment plant, the cleaner technology is better since, on one side, the rate of recovery of the treatment plant is slightly lower (26.81%), and most importantly, the wastewater treatment plant can only remove about 80% of the organic matter content.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

El proceso de secado es una operación unitaria que implica la separación del agua (o de cualquier solvente líquido volátil) de los materiales sólidos. A diferencia de la evaporación donde el agua se separa en forma de vapor a su punto de ebullición, en el secado el agua casi siempre se elimina con aire seco. El secado suele ser la etapa final de los procesos antes del empaque y permite que los materiales sean más adecuados para su manejo.

La operación de secado incluye dos procesos fundamentales de transporte: la transferencia de masa y la transferencia de calor. Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la velocidad de secado del material. La humedad se puede transferir en forma de líquido o vapor desde el interior del sólido y como vapor que se desprende de las superficies expuestas al secado. Asimismo, la estructura del sólido determina el mecanismo por el cual puede ocurrir el flujo interno del líquido. Estos mecanismos son generalmente: 1) la difusión en los sólidos homogéneos continuos y 2) el flujo capilar en los sólidos granulados y porosos.

Los secadores industriales se pueden clasificar de distintas maneras; sin embargo, una clasificación general es con base en las condiciones de transferencia de calor o bien por el método de operación. Otras clasificaciones menos fundamentales pueden ser por el tipo de contacto gas-sólido o, bien, de acuerdo a la condición del movimiento del sólido en el secado. La forma física de la sustancia a secar y los diferentes métodos de manejo necesarios influyen sobre el secador que se va a utilizar; de esta manera se tienen distintos tipos como el secador de charolas, el secador continuo de túnel, el secador rotatorio, el secador de tambor, el secador por pulverización, el secador neumático, etc.

En el presente trabajo se evalúan las condiciones de operación en el secador (ventajas y desventajas), desde el punto de vista de diferentes secadores para que sean adecuados a las características del material biológico a secar, la flor conocida como cempasúchil.

Experimentalmente se trabajó con un secador de charolas tipo túnel donde se realizaron diferentes pruebas de secado, se obtuvieron datos de humedad crítica, tiempo crítico y

humedad final ya que son parámetros muy importantes que sirvieron para las elecciones, así como para la evaluación de prefactibilidad económica.

## 1.2 Antecedentes e importancia del proceso

Los carotenoides son colorantes naturales de origen vegetal, cuya tonalidad abarca desde el amarillo hasta el rojo-naranja, siendo hidrocarburos solubles en grasas e insolubles en agua. Es uno de los grupos más ampliamente distribuidos en la naturaleza y se les puede encontrar tanto en plantas (hojas verdes, frutos y flores) como en animales.

La característica que hace importante a este grupo de pigmentos es que algunos de ellos funcionan como provitaminas de la vitamina A. Los carotenoides han sido divididos en dos grupos: Carotenos y xantofilas. Estas últimas son derivados oxigenados de los carotenos. Cuando son consumidos por animales tienden a concentrarse en lípidos y, por lo tanto, se encuentran en sangre, leche, yema de huevo y en depósitos de grasas.

El cempasúchil (del náhuatl *cempoalli*, veinte, el número máximo del sistema vigesimal y *xóchitl* flor) es una planta herbácea anual que alcanza de 50 a 60 cm de altura, sus hojas son opuestas, divididas y sus flores son olorosas de 5 o 6 cm de diámetro dobles.

Dicha flor se convierte en materia prima para la elaboración de harina, de la cual posteriormente se extrae el pigmento para ser comercializado.

La harina se considera como la mejor fuente de vitamina A y xantofilas. Las xantofilas acompañan a los carotenos en 1.7 veces más que estos; es decir, la harina de cempasúchil deshidratado constituye el ingrediente más rico de la ración para las aves de carne y las de postura, pues tiene la ventaja de darles una pigmentación amarillo-anaranjada, tanto en las carnes y piel como en las yemas de los huevos que se distribuyen en el mercado. Esta particularidad se considera sumamente deseable, tanto sensorialmente como por ser un precursor de la vitamina A.

Por medio de estudios sensoriales realizados se ha podido concluir que el color causa una mayor impresión que el sabor, además de que influye en la habilidad de identificar un sabor y asociarlo con una calidad.

El cultivo del cempasúchil en el pasado era estacional. Sin embargo, actualmente, es cultivada también por riego (tabla 1.1). Según datos obtenidos en la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1994), los estados donde tradicionalmente se cultiva la flor ya sea en época temporal o por riego son Oaxaca, Jalisco, Michoacán y Chiapas, principalmente (tabla 1.2).

La producción de cempasúchil ha experimentado un incremento en los últimos años, debido tal vez al apoyo que se dió para su cultivo en el sexenio pasado (el caso de Sinaloa con el 70% de la producción nacional).

**Tabla 1.1** Producción de cempasúchil por año agrícola en toneladas (SARH 1994)

AÑO AGRÍCOLA	PRODUCCIÓN
1990	47, 299
1991	46, 591
1992	128, 457
1993	216, 128

**Tabla 1.2** Producción de cempasúchil por entidad federativa y por forma de cultivo, participación en el total del año agrícola 1993, en toneladas (SARH, 1994)

ESTADO	RIEGO	TEMPORAL	TOTAL	%
Baja California Sur	10	-	10	0.005
Chiapas	905	308	1,213	0.561
Distrito Federal	-	835	835	0.386
Durango	36	-	36	0.017
Guanajuato	20,668	346	21,014	9.723
Guerrero	8	-	8	0.004
Hidalgo	1283	-	1283	0.594
Jalisco	420	-	420	0.194
Michoacán	6,799	1,440	8,239	3.812
Morelos	796	312	1108	0.513
Oaxaca	8,026	-	8,026	3.713
Puebla	3,773	17,043	20,816	9.631
Sinaloa	153,120	-	153,120	70.847
TOTAL	195,844	20,284	216,128	100.00

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTUDIO DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE HARINA DE CEMPASÚCHIL**

#### **2.1 Descripción del proceso**

El proceso de elaboración de la harina de cempasúchil en México se lleva a cabo de la siguiente forma:

La obtención del cempasúchil para consumo de la harinera está basado en un contrato con los campesinos de la región, en el cual se les ofrece semilla y asesoramiento técnico gratuito así como la compra total de la cosecha a cambio del cultivo de la flor. De esta forma se asegura el suministro de materia prima a la fábrica y, al mismo tiempo, se reducen los costos de transportación, ya que la flor es sembrada en terrenos cercanos a la propia planta deshidratadora.

Una vez logrado el contrato, se lleva a cabo el cultivo llamado almácigo, que consiste en la siembra de la semilla en un espacio reducido (tipo invernadero). Esta operación dura de 25 a 35 días, en los cuales se verifica el crecimiento de la planta, para ser luego transplantada al área final de cultivo. A las 9 o 10 semanas después de ser transplantada la flor, se realiza el ensayo de cosecha (calentón), en la que se cortan los primeros botones abiertos de las plantas con el objeto de que florezcan los demás. A lo largo del tiempo de vida de la flor se llevan a cabo 5 ó 6 cortes con un período de 12 a 15 días entre uno y otro.

El corte y recolección de la flor se lleva a cabo manualmente, siendo transportada en camiones de redilas para ser entregada a pie de fábrica. Estas actividades están basadas en la programación que hace el ingeniero de campo, de tal forma que siempre haya un buen abastecimiento y no se produzcan cuellos de botella o pérdidas de material por exceso de materia prima (tabla 2.1).

Se producen 25 000 ton de flor fresca por año para el consumo de una fábrica harinera promedio.

**Tabla 2.1** Rendimiento promedio de una hectárea (Cázares-Valenzuela, 1996)

CORTE	TONELADAS
Ensayo	0.2
Primer	2.0
Segundo	3.0
Tercer	3.0
Cuarto	2.0
Quinto	1.8
TOTAL	12.8

## **2.2 Operaciones del proceso**

### **Ensilado**

Esta operación comienza en el momento que es entregada la flor, para lo cual se levantan muros de concreto preformado de 2 a 2.5 metros de altura, donde la superficie del silo dependerá de la materia prima que llegue del campo. El ensilado consiste en la compactación y descomposición anaerobia de la flor con el fin de romper las paredes celulares del tejido de los pétalos eliminándose una cantidad sustancial de agua del tipo ligado. Se debe tener cuidado al ensilar ya que no deben existir espacios vacíos entre las flores, lo que generaría una oxidación y una disminución en la calidad de la harina (disminuye la cantidad de caroteno). Por lo tanto, los silos deben estar tapados. En el ensilado, la flor es mantenida a una temperatura de 35°C aproximadamente por un período de 15 días.

### **Prensado**

Después de los 15 días que dura el ensilado, la flor es pasada al prensado mecánico que se realiza por medio de una prensa sinfin y que tiene por objeto eliminar otra cantidad sustancial de agua.

### **Picado**

De la prensa se obtiene una materia en forma de terrones, lo que obliga a que se realice la operación de picado con el fin de homogeneizarla antes del secado.

### **Secado**

Una vez picada, la flor se transporta por medio de trascabos al sitio de secado, donde existen 10 celdas de secado con dimensiones de 6 por 6 metros cada una y con una malla por donde se hace circular aire caliente a una temperatura de 65°C con flujo perpendicular. El aire es calentado al pasar por un quemador de gas LP.

El secado se efectúa por convección y se realiza formando una cama de flor de 40 cm de espesor, la cual es atravesada por el aire caliente, dicha cama es volteada cada hora y media; el tiempo total de secado es de 12 a 14 horas. La flor entra con 25 a 30% de humedad (en base húmeda) y sale con una humedad entre 5 y 10% (en base húmeda). Se producen aproximadamente 3 toneladas de harina por cada celda.

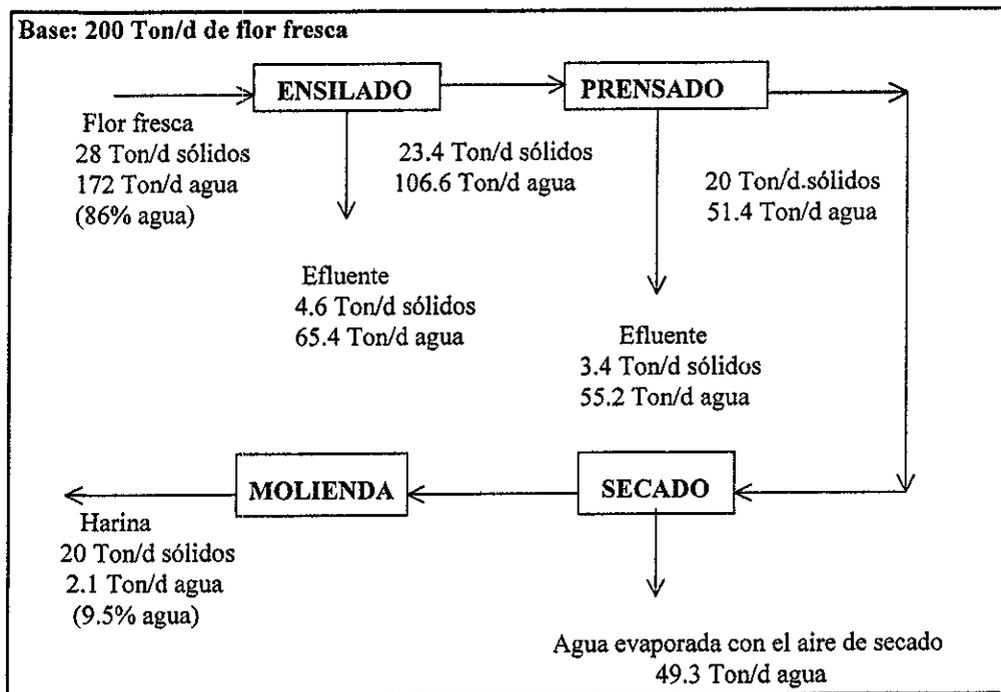
### Empacado

La harina es empacada en bolsas negras de 25 kg debido a que el pigmento sufre degradación por la luz. Bajo las condiciones de operación descritas anteriormente la harina tiene una duración de almacenamiento de un mes aproximadamente si se mantiene en lugares secos y con temperatura templada.

### 2.3 Diagrama de flujo de proceso

La Fig.2.1 presenta el diagrama de flujo del proceso descrito en el inciso anterior incluyendo un balance de masa que toma como base el procesamiento de 200 toneladas de flor fresca por día.

**Fig.2.1** Diagrama de bloques y balances de masa para una planta deshidratadora de cempasúchil en México (García-Hernández, 1993)



## 2.4 Análisis del problema de la generación de efluentes en el proceso

Analizando el diagrama de flujo de proceso (Fig. 2.1) se nota que las operaciones de ensilado y prensado generan dos corrientes de efluentes las cuales tienen un alto contenido de sólidos en suspensión y disueltos. Estas aguas, debido a sus características, son potencialmente dañinas para el medio ambiente (Tabla 2.2).

Actualmente los efluentes son descargados en una grieta natural con la consecuente generación de multas por parte, anteriormente, de la Secretaría de Desarrollo Social o SEDESOL y ahora por parte de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca o SEMARNAP (Profepa), ya que no cumplen con las condiciones particulares de descarga (CPD).

**Tabla 2.2** Características de las aguas de ensilado y prensado de cempasúchil en mg/L  
(Anónimo, 1990)

PARAMETROS	PRENSADO	ENSILADO	CPD*
Sólidos sedimentables, mL/L	600	-	1
Sólidos suspendidos totales, mg/L	24,000	3,150	350
Sólidos suspendidos volátiles, mg/L	19,700	2,900	-
Sólidos disueltos totales, mg/L	23,400	36,300	-
Fosfatos totales, mg/L	1,500	1,580	10
N-amoniaco	330	270	-
N-orgánico, mg/L	830	320	3
Demanda química de oxígeno total, mg/L	72,600	92,000	-
Demanda química de oxígeno soluble, mg/L	48,300	51,700	400
Demanda bioquímica de oxígeno total, mg/L	40,170	56,900	-
Demanda bioquímica de oxígeno soluble, mg/L	28,900	29,900	350
Grasas y aceites, mg/L	470	486	15
Coliformes totales, NMP <sup>†</sup> /100mL	0	0	20,000
Conductividad, µmho/cm	-	-	2,000
pH, unidades	4.1	4.7	6-9
Caudal, L/s	0.5	0.9	-
Temperatura, °C	-	-	30
Material flotante, >3mm <sup>2</sup>	-	-	0
Color, unidades Pt-Co	-	-	100
Relación DBO soluble a DQO soluble	0.598	0.578	-

<sup>†</sup>NMP = número más probable

\* Referido al valor máximo permisible en muestras individuales, según oficio No. 410-2 437 del 18 de junio de 1986

Los parámetros de la tabla anterior (DQO de 400 vs 48,300 a 51,700 y DBO de 350 vs 28,900 a 29,900) son prácticamente inalcanzables en términos de viabilidad económica para los efluentes generados en el proceso de obtención de harina de cempasúchil por ello se ha promovido la búsqueda de una tecnología apropiada para su manejo y control encontrándose dos posibles soluciones:

- a) El tratamiento de los efluentes generados.
- b) La instalación de una tecnología que no genere efluentes (tecnología limpia).

La primera opción implica la construcción de una planta de tratamiento de aguas de residuos (Chávez-Sánchez y col., 1995; Maciel, 1997). En estudios previos se ha determinado la viabilidad técnica de tratar el agua residual del proceso por medios biológicos en forma anaerobia/aerobia, dada la relación de biodegradabilidad DBO/DQO (Casarrubias y Hernández, 1996). Esta solución está siendo analizada a nivel experimental en un reactor piloto; sin embargo, falta el escalamiento a nivel prototipo.

La segunda opción pretende instalar un secador capaz de eliminar una cantidad de agua igual a la que se genera por las operaciones de ensilado y prensado evitando sus efluentes.

En el presente trabajo se analiza la conveniencia de eliminar estas operaciones y sus respectivos efluentes instalando una tecnología más limpia basada en la selección de un secador (o sistema de secado), capaz de eliminar el agua contenida en la flor sin deteriorarla. Además, se hace una evaluación económica preliminar en la que se compara este secado contra los costos generados por pago de multas por vertimiento de aguas residuales para determinar si es viable la instalación.

## CAPÍTULO 3

### SECADO

#### 3.1 Generalidades del secado

Generalmente, el término de secado se refiere a la eliminación de agua u otros líquidos orgánicos que se encuentran en cantidades pequeñas en un material sólido, mientras que la evaporación se refiere a la eliminación de grandes cantidades de agua (Geankoplis , 1995).

El secado es una operación en la que se utiliza una corriente de aire seco la cual generalmente está caliente aunque se puede utilizar también fría. Dicha corriente se hace circular por el sólido o semisólido y tiene la función de transferir masa y transmitir calor para evaporar el agua que se encuentra en su interior, la cual por medio de mecanismos tales como la difusión y la capilaridad llegará a la superficie para luego ser arrastrada por el aire. Al efectuar el secado con aire caliente se está generando un gasto energético lo cual se traduce finalmente en un gasto económico; por lo tanto, el secado como operación unitaria se utiliza una vez que se ha reducido el contenido de humedad del material sólido por otros medios principalmente mecánicos para reducir los costos.

En la industria, el secado se utiliza principalmente para lograr impartirle al producto ciertas características que lo hagan cumplir con normas de calidad en lo que respecta a contenido de humedad, las cuales en muchas ocasiones se le piden en el mercado. Sin embargo, no es la única aplicación del secado ya que se puede decir que son pocas las industrias que no tienen la necesidad de usarlo en mayor o menor escala y entre las ventajas que ofrece se encuentra la reducción del volumen de carga cuando ésta se debe transportar largas distancias, lo cual disminuye el costo por transporte.

Tal es el caso de las hortalizas y forrajes en los que su peso se reduce hasta su quinceava parte (tratándose de vegetales de hoja, por término medio, 7500 kg de producto fresco cuya ubicación requiere de más de 20 m<sup>3</sup>, puede quedar reducido a 625 kg de producto seco que sólo precisan 1m<sup>3</sup>). El secado también cumple con la conservación de estos alimentos debido a que en los vegetales el contenido de agua es determinante para que la descomposición se lleve o no a cabo. Los microorganismos y enzimas que provocan cambios químicos y descomposición del alimento no pueden crecer y multiplicarse en ausencia del agua, esto es, a humedades menores del 10%; por lo tanto, el alimento conserva su sabor y valor nutritivo por

mucho tiempo. Esto es particularmente interesante en zonas de mucha producción y poco consumo (Pistono-Raschieri, 1955).

El secado, como se mencionó al inicio de este capítulo, está basado en dos mecanismos de transferencia, el de calor y el de masa. El primero está encargado de suministrar la energía necesaria para la evaporación del líquido desde el interior del sólido hasta la superficie. Si el calor que se suministra para la evaporación del agua lo da la corriente de aire en contacto con el sólido a secar, el mecanismo que predomina es la convección y se dice que el proceso es adiabático. Cuando el calor se suministra por un medio independiente del aire y este solo se emplea para arrastrar el vapor generado, los mecanismos que predominan son: la conducción y la radiación; entonces, al proceso se le llama no adiabático.

El calor que se necesita para secar un material húmedo incluye:

- El calentamiento del sólido y del líquido a la temperatura de vaporización
- El calor para la evaporación del líquido
- El calentamiento del sólido y el vapor a su temperatura final

### 3.2 Períodos de secado

Dentro de la operación de secado cuando el gas caliente que es suministrado al sistema se encuentra a temperatura y humedad constantes, aparecen dos patrones de comportamiento a los cuales se les denomina periodos de secado, a velocidad constante y a velocidad decreciente.

Cuando los sólidos se secan experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo. A continuación, estos datos se representan gráficamente como el contenido de humedad (base seca)  $W$ , en función del tiempo, como se muestra en la Fig. 3.2.1. Esta curva representa el caso general en que los sólidos mojados pierden humedad primero por evaporación debido a una superficie saturada del sólido, a lo cual sigue un período de evaporación de la superficie saturada que tiene un área gradualmente decreciente y, por último, cuando el agua se evapora en el interior del sólido.

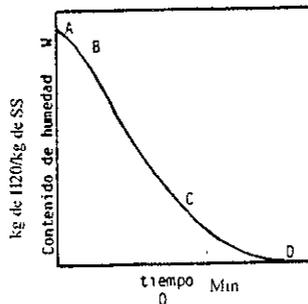


Fig. 3.2.1 Contenido de humedad en función del tiempo

Cuando se diferencia gráfica o numéricamente la curva anterior, se obtiene una curva de velocidad de secado en función de la humedad. El punto E representa el punto en que toda la superficie expuesta se hace completamente insaturada y marca el principio de la porción del ciclo de secado durante el cual la velocidad del movimiento de la humedad interna controla la velocidad de secado (Fig. 3.2.2).

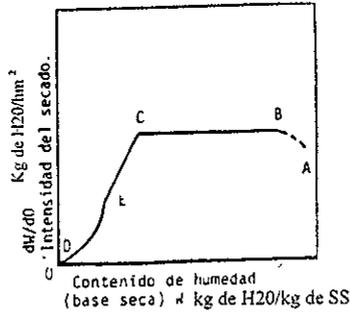


Fig. 3.2.2 Velocidad de secado en función del contenido de humedad

En la fig. 3.2.3 se indica con claridad lo que dura cada período de secado. El segmento A-B de la curva representa el período de calentamiento del sólido y el agua que contiene, el punto B es donde realmente se puede considerar que empieza el secado. El segmento B-C se denomina período de velocidad constante, el punto C es donde se localiza el contenido crítico de humedad dejando de existir la velocidad constante para dar paso al período de velocidad decreciente representado por la curva C-D de la gráfica en la cual se puede apreciar la variación de la velocidad a lo largo del ciclo de secado.

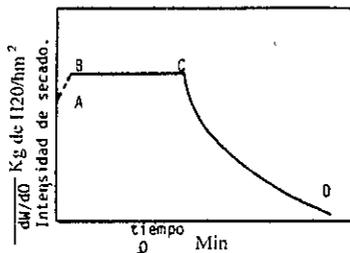


Fig. 3.2.3 Velocidad de secado en función del tiempo

### **3.2.1 Período de velocidad constante**

Todos los líquidos tienen una presión de vapor para cada temperatura. Esta presión en la superficie de un sólido a secar es muy similar a la del líquido puro a la misma temperatura. Cuando la presión parcial del aire que se utiliza para el secado es menor a la presión de vapor del líquido, la evaporación puede ocurrir.

El período de velocidad constante comienza cuando la temperatura del sólido se ajusta hasta alcanzar un estado estable. En este período, el secado ocurre en la superficie del material, la cual se encuentra completamente húmeda, gracias a que el flujo de agua (transferencia de masa a través del sólido) es lo suficientemente rápido para mantener la superficie húmeda mientras ocurre la evaporación. Si las condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire se mantienen constantes, el material llega a una temperatura de equilibrio, en la cual el calor sensible que transfiere el aire al material es igual al calor latente absorbido para la evaporación del agua.

En este período mientras más alta sea la temperatura de la superficie del material, mayor será la presión de vapor y, por lo tanto, la velocidad de secado crecerá. Ya que el calor se recibe por convección del aire, la temperatura de la superficie es aproximadamente la temperatura de bulbo húmedo del aire.

La velocidad de secado está determinada por la velocidad de difusión del vapor a través de la película gaseosa que recubre la superficie de secado hacia el seno de la corriente del gas. Debido a que la superficie expuesta está saturada de agua, el secado procede sin que el sólido influya en forma directa sobre la velocidad de secado.

La humedad del aire también influye en la velocidad de secado ya que entre menor sea la humedad relativa, mayor puede ser la transferencia de agua del sólido al gas, sin embargo se debe cuidar ésta condición debido que no es favorable en el período de velocidad decreciente por contribuir a crear el efecto de endurecimiento superficial.

### **3.2.2 Período de velocidad decreciente**

Este período comienza una vez que la superficie del sólido deja de estar completamente húmeda. También en este período deja de ser la diferencia de presiones la que controla la velocidad de secado, pasando a ser la velocidad del movimiento de la humedad dentro del sólido el factor determinante para la vaporización del líquido.

Al porcentaje de humedad en el punto de inicio de este período se le conoce como el contenido crítico de humedad, después del cual la velocidad de secado decrece continuamente. Las condiciones de velocidad y humedad del aire no afectan a la velocidad del secado; sin embargo, la temperatura y el gradiente de humedad del material se vuelven importantes.

El sólido, al ir perdiendo humedad, empieza a incrementar su temperatura hasta aproximarse a la temperatura del aire. Los factores principales que gobiernan la velocidad de secado son:

- La dispersión de la humedad.- Un secado rápido requiere la exposición de una gran superficie, un conglomerado de materia tiene características poco favorables para el secado; en cambio, las partículas suspendidas en el vapor se ven favorecidas.
- La diferencia de temperatura.- El tiempo de secado es proporcional a la diferencia entre la temperatura del medio secante y la temperatura del material a secar.
- La agitación.- El movimiento rápido del material y del medio favorece un secado a mayor velocidad.
- Tamaño de partícula.- El secado se caracteriza por la evaporación en la superficie de la partícula seguida de un secado de la humedad interna (operación que se lleva a cabo por difusión), esta transferencia es más rápida en partículas pequeñas.

### **3.3 Mecanismos de transferencia de masa dentro del sólido**

El calor que se necesita para secar un material húmedo incluye:

- El calentamiento del sólido y del líquido a la temperatura de vaporización,
- El calor para la evaporación del líquido y, por último,
- El calentamiento del sólido y el vapor a su temperatura final.

Cuando el secado se verifica por evaporación de la humedad del área expuesta del sólido, la humedad se debe desplazar desde el interior del sólido hasta la superficie, siguiendo varios mecanismos como son:

- Difusión.- Ocurre en sólidos homogéneos continuos
- Flujo capilar.- En sólidos granulados y porosos
- Flujo provocado por gradientes de concentración y presión
- Flujo provocado por humedad
- Flujo originado por una secuencia de vaporización y condensación

Generalmente, un mecanismo es el que predomina en un lapso dado de secado; Sin embargo, no es extraño encontrar diferentes mecanismos que predominan a lo largo de la operación, teniéndose como principales a los dos primeros.

#### **3.3.1 Mecanismo de transferencia por difusión**

La difusión de la humedad líquida a lo largo del sólido ocurre cuando existe una diferencia de concentraciones entre el interior del sólido y la superficie y se presenta en sólidos no porosos donde se forman soluciones de una sola fase con la humedad. En el secado de muchos materiales alimenticios el movimiento del agua se da por difusión y las formas de las curvas de distribución de la humedad en el sólido a diferentes tiempos concuerdan cualitativamente con las ecuaciones de difusión en estado estable.

La difusión de la humedad casi siempre disminuye al reducirse el contenido de agua en el sólido, por lo que las difusividades son valores promedio en el intervalo de concentraciones consideradas.

### **3.3.2 Mecanismo de transferencia por capilaridad**

Este mecanismo se da porque la humedad libre se desplaza a través de capilares y espacios vacíos de los sólidos por acción capilar. En este mecanismo intervienen la tensión superficial y ocurre conforme se evapora el agua. Se forma un menisco en cada poro en el interior del sólido y esto origina fuerzas capilares por la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas constituyen un impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie, los poros pequeños desarrollan fuerzas menores.

Al evaporarse la capa superficial del agua ésta empieza a bajar su nivel en el sólido y si se sigue evaporando en forma continua se llega a un punto en donde no hay suficiente agua para mantener una película continua en todos los poros y la velocidad de secado disminuye repentinamente; entonces, la velocidad de difusión de vapor de agua en los poros y la velocidad de conducción de calor en el sólido pueden llegar a ser los factores principales en el secado. Los poros finos suelen obedecer la ley de difusión y la curva resulta cóncava.

### **3.3.3 Efecto de contracción**

Frecuentemente, la velocidad de secado es afectada por una barrera a la migración de la humedad que se conoce con el nombre de endurecimiento superficial, el cual es causado por la contracción del material que se está secando desarrollándose una capa dura en la superficie del sólido, que resulta ser impermeable al flujo del líquido o de vapor y disminuyendo la velocidad de secado. Para disminuir este efecto es aconsejable secar con aire ligeramente húmedo de tal forma que se disminuya la velocidad de secado reduciéndose notablemente los efectos de contracción (Geankoplis, 1995). Este fenómeno se presenta generalmente en materiales coloidales y fibrosos como los vegetales y otros productos alimenticios y es causado por la eliminación rápida de la humedad, por lo que resulta aconsejable para disminuir estos efectos, el secar con aire caliente y húmedo, de tal forma que aunque se disminuye la velocidad de secado se logran reducir notablemente los efectos de contracción.

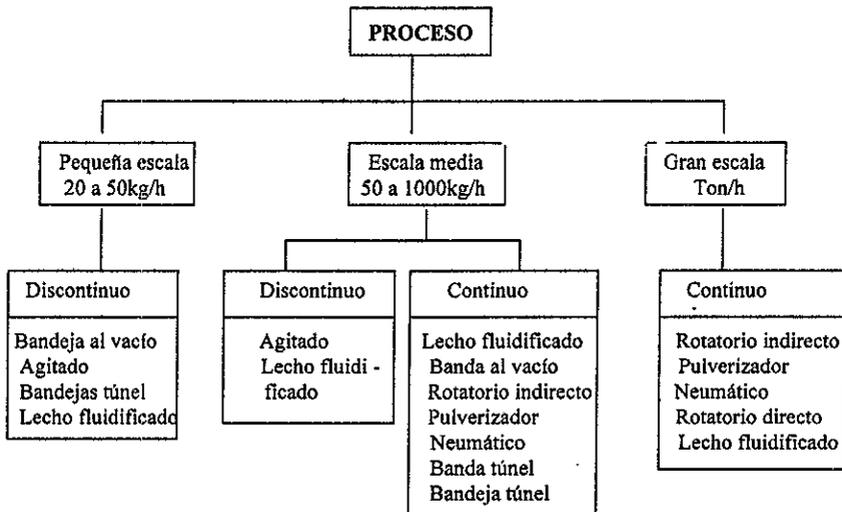
## **3.4 Clasificación de secadores**

El desarrollo de equipo ha sido grandemente empírico, a pesar del gran número de maquinaria que se ofrece para procesos similares. En la tabla 3.4.1 se presenta una clasificación de ellos.

Los secadores se clasifican según el método de transferencia de calor en:

1.- Secadores directos continuos: La transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes la operación es continua sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda. Es evidente que en cualquier secador continuo puede funcionar en forma intermitente o por lotes.

**Tabla 3.4.1** Clasificación de los secadores por su escala de producción (Perry y col., 1992)



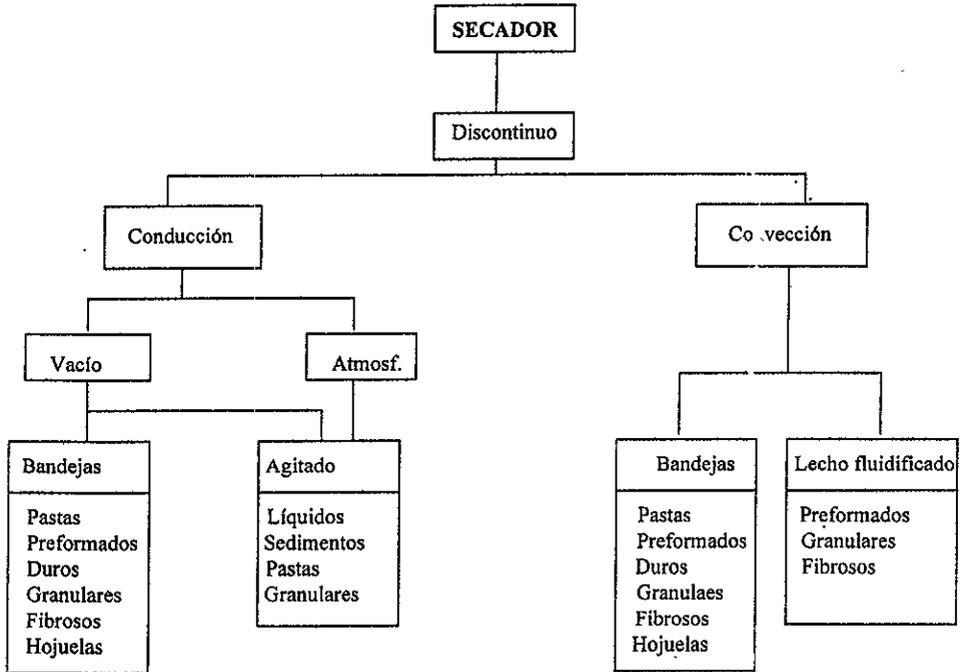
2.- Secadores directos por lotes: Los secadores se diseñan para operar a un tamaño específico de lote de alimentación húmeda, para ciclos de tiempos dados. En los secadores por lotes, las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto de equipo.

3.- Secadores indirectos continuos: El calor para secar se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. El secado se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador y poniéndose en contacto con la superficie caliente.

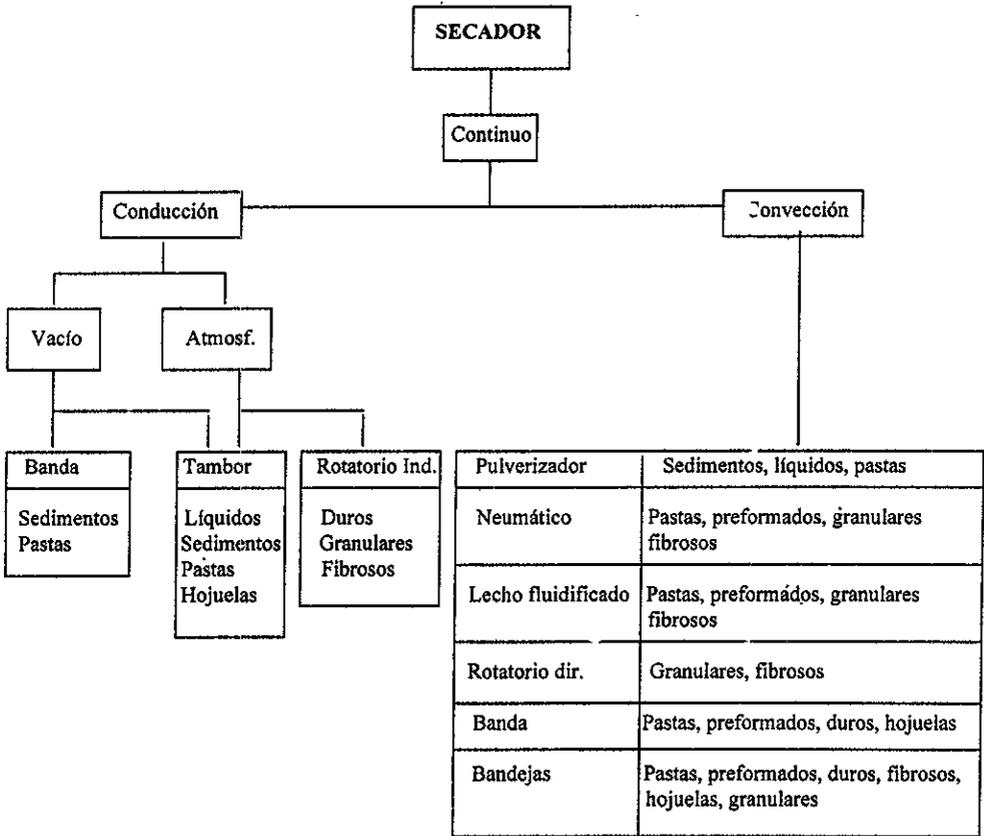
4.- Secadores indirectos por lotes: En general, los secadores indirectos por lotes se adaptan muy bien en operaciones al vacío. Se subdividen en tipos agitados y no agitados.

En tablas 3.4.2 y 3 se presenta una clasificación de los secadores basada en su método de operación, el tipo de productos que pueden secar y su forma física. Finalmente, la tabla 3.4.4 los clasifica de acuerdo a posible peligrosidad en su manejo, termolabilidad, alteraciones debidas a oxidación o manejo mecánico o a que requieren una presentación específica.

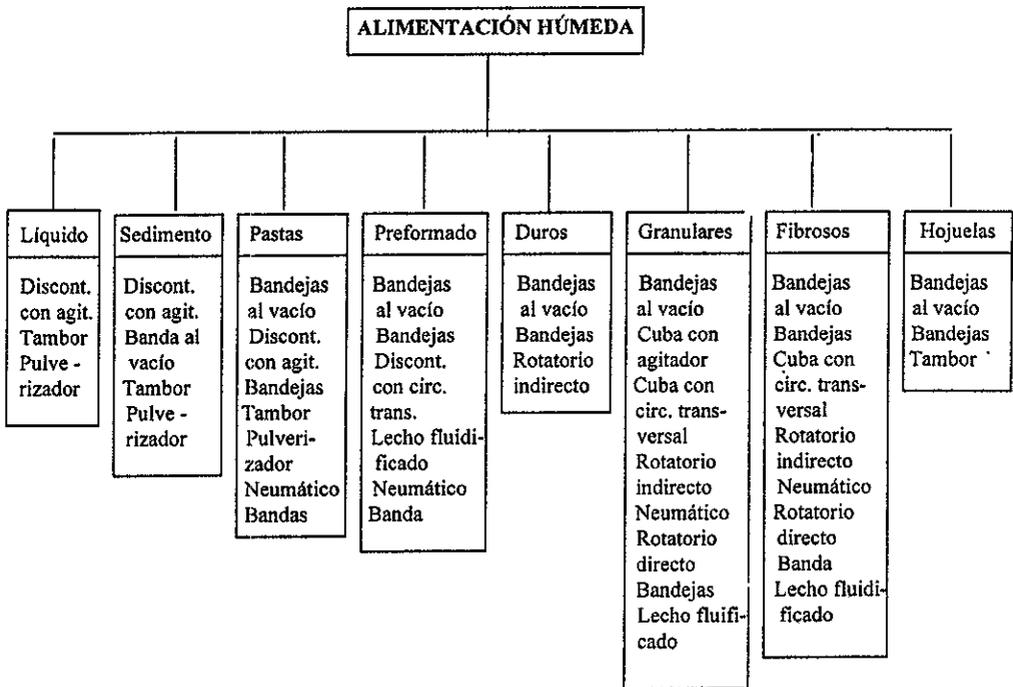
**Tabla 3.4.2** Clasificación de los secadores con base en su método de operación  
(Perry y col., 1992)



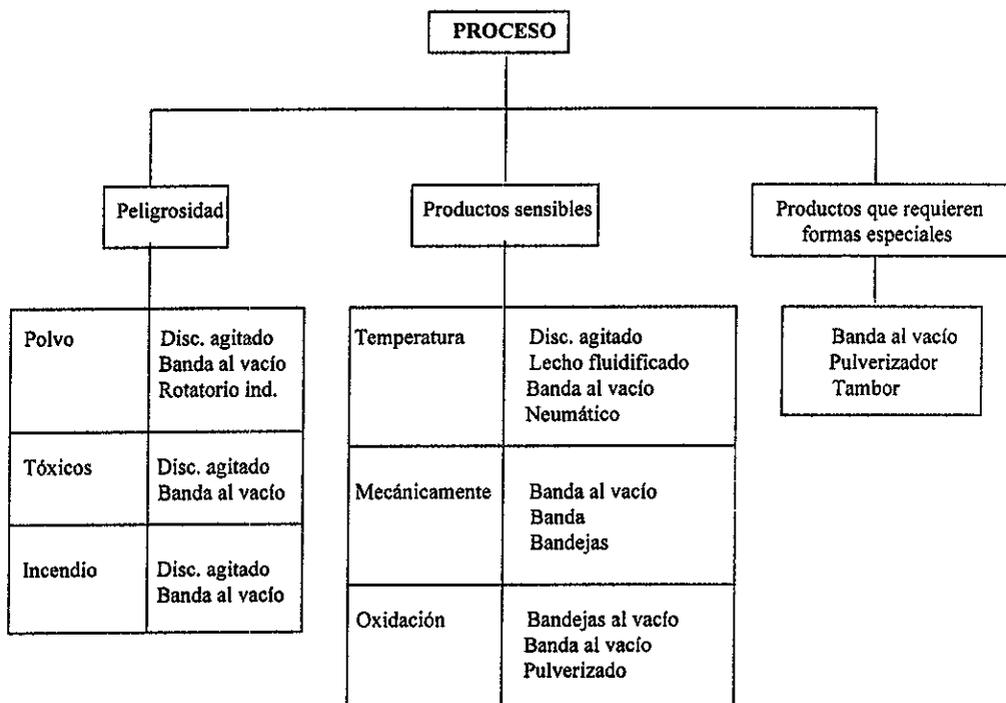
**Tabla 3.4.2** Clasificación de los secadores con base en su método de operación (continuación)



**Tabla 3.4.3** Clasificación de los secadores con base en la forma física de la alimentación  
(Perry y col., 1992)



**Tabla 3.4.4** Clasificación de los secadores por las características fisicoquímicas o de presentación de los productos (Perry y col., 1992)



## **CAPÍTULO 4**

### **PRUEBAS DE SECADO**

Las pruebas de secado establecen las condiciones de operación óptimas, la capacidad del secador para manejar físicamente el material, la calidad y las características del producto y el tamaño del secador.

#### **4.1 Determinación experimental de la humedad crítica y curvas de secado**

El punto en que se produce el cambio de período de velocidad constante a velocidad decreciente, llamado a menudo de humedad crítica, es una función de la velocidad de secado a velocidad constante que viene impuesta por las condiciones externas, y la disposición del secado y de la transferencia de materia, que depende del material a secar (Razous, 1955).

Por ello la humedad crítica es un parámetro sumamente importante dentro del secado para el diseño y la realización de pruebas experimentales llevan a establecer condiciones de operación óptimas. Los experimentos en los laboratorios son de naturaleza sencilla y contribuyen a reducir la cantidad de secadores sometidos a una evaluación.

En el presente trabajo se evaluó la humedad crítica por medio de pruebas de secado realizadas en un secador intermitente tipo túnel ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM (Fig. 4.1).

#### **4.2 Acondicionamiento del secador**

Es factible realizar experimentos sencillos de laboratorio, que resultan más económicos y satisfactorios y que permiten obtener variables necesarias para la selección de los equipos a mayor escala. Es por eso que en el presente trabajo, las pruebas de secado se efectuaron en un secador experimental de laboratorio controlando las condiciones de proceso.

Se usaron dos charolas de muestreo, de dimensiones menores a las de una charola normal, con el fin de retirarlas con facilidad del interior del secador. Se colocaron dos termómetros a través de orificios en la pared exterior del túnel de secado, uno a la entrada y el otro a la salida del secador para obtener las temperaturas de bulbo seco experimentales.

## **4.3 Descripción del experimento**

### **4.3.1 Diseño del experimento**

En este experimento se trabajó con cempasúchil, esta flor tiene de 85 a 99% de agua. El objetivo de este experimento fue disminuir el % de agua, por lo que la flor se sometió a un proceso de secado. El tipo de secador utilizado fue de charolas tipo túnel. Este proceso se realizó en cuatro corridas con diferentes condiciones para así poder construir las curvas de secado y obtener posteriormente los puntos de humedad crítica, tiempo crítico y velocidad crítica, ya que estos parámetros son de gran importancia para seleccionar el secador.

### **4.3.2 Materia prima**

La flor (cempasúchil) fue cortada de las chinampas de Xochimilco, Distrito Federal, México. El tamaño de la muestra individual fue de 3 a 4 cm de diámetro. Una de las características que se consideraron para el secado, fue que la materia prima tuviera una calidad 100% fresca y que la flor sea de la especie amarilla de pétalos abundantes.

### **4.3.3 Equipo utilizado**

**Secador de charolas tipo túnel:** El secador de charolas tipo túnel que fue utilizado está construido de láminas de acero inoxidable cubiertas con pintura anticorrosiva, tiene una balanza granataria que se encuentra en la parte superior del túnel y, dentro del túnel, existen 4 charolas de igual tamaño colgadas, separadas verticalmente y sujetas en un mismo eje.

El sistema de calentamiento del aire de secado se hace a través de un cambiador de calor de tubos en posición aleatoria por los que circula vapor proveniente de una caldera, el aire de secado es impulsado por un ventilador de hélices de metal con un motor de  $\frac{1}{4}$  de HP. Finalmente, consta de un manómetro colocado a un lado, el cual mide la presión de vapor que, a su vez, es controlada por una válvula que se opera manualmente. De esta forma se puede fijar la temperatura del aire de secado (Fig. 4.1).

## **4.4 Pruebas de secado**

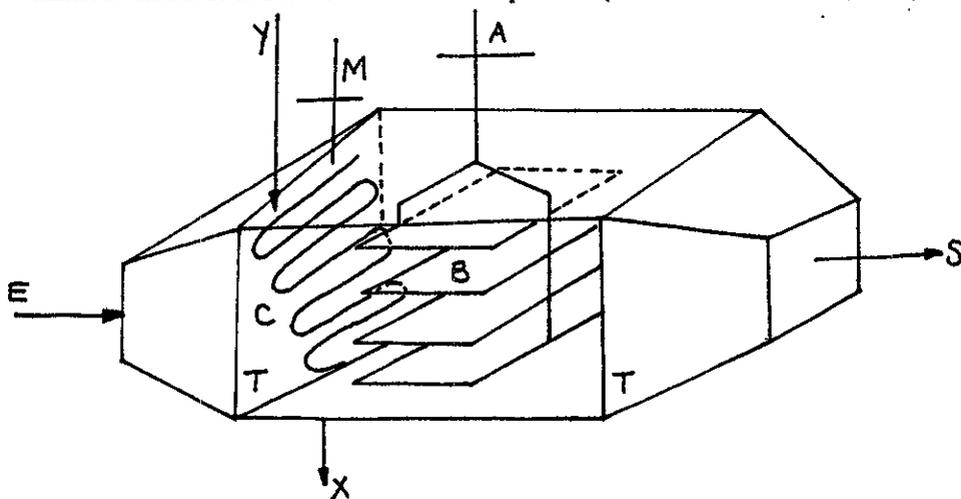
Las pruebas de secado permiten establecer las condiciones de operación óptimas, la capacidad del secador para manejar físicamente el material, la calidad y las características del producto y el tamaño del secador.

En estas pruebas se efectuaron lecturas (por medio de psicrómetros y termómetros) de temperaturas del aire a la entrada y salida del secador, tanto de bulbo seco como de húmedo, así como la temperatura de secado (tabla 4.1).

Los datos obtenidos durante estas pruebas se indican en las tablas 4.2 a la 4.5, donde se aprecia la disminución de peso de la muestra y los tiempos en los que estos se evaluaron. En ellas,  $W_t$  es el peso de las charolas conteniendo la flor húmeda,  $W_{flor}$  es el peso de las flores húmedas,

$X_t$  es la humedad en base seca,  $X$  es el contenido de humedad,  $t$  es la diferencia de tiempos de secado,  $\Delta(x)$  es la diferencia de humedades y  $R$  es la velocidad o rapidez de secado.

Fig. 4.1 Diagrama del secador de charolas tipo túnel empleado en la determinación de la humedad crítica de la flor conocida como cempasúchil (García-Price-Villarreal, 1985)



**PARTES DEL SECADOR**

- |                        |                      |                     |               |
|------------------------|----------------------|---------------------|---------------|
| A = Balanza granataria | E = Entrada del aire | S = Salida del aire | M = Manómetro |
| B = Charolas           | V = Ventilador       | T = Termómetro      |               |
| C = Serpentin de vapor | X = Condensado       | Y = Vapor           |               |

Tabla 4.1 Lecturas promedio obtenidas experimentalmente en cuatro corridas

PRUEBAS	1	2	3	4
TBH entrada, °C	13.5	13	13	14
TBH salida, °C	22.5	21.5	21	22
TBS entrada, °C	19.5	16.5	18	18.5
TBS salida, °C	49	45	50	51
Temperatura de secado, °C	51	50	52	52
Velocidad del aire de secado, m/s	2075	2303	2090	2310

TBH = temperatura de bulbo húmedo

TBS = temperatura de bulbo seco

Temperatura de secado = temperatura del aire dentro del secador

Tabla 4.2 Valores de la velocidad de secado de la prueba 1

tiempo(min)	Wt(g)	Wflor(g)	Wflor(kg)	Xt	X	Deltat(h)	Deltax	R
0	1643.00	279.50	0.2795	6.1429	6.0440	0	0	0
5	1643.00	279.50	0.2795	6.1429	6.0440	0.0833	0.0000	0.0000
10	1642.00	278.50	0.2785	6.1173	6.0184	0.0833	0.0256	0.1500
15	1639.50	276.00	0.2760	6.0534	5.9545	0.0833	0.0639	0.3749
20	1637.50	274.00	0.2740	6.0023	5.9034	0.0833	0.0511	0.2999
25	1634.00	270.50	0.2705	5.9129	5.8140	0.0833	0.0894	0.5249
30	1631.00	267.50	0.2675	5.8362	5.7373	0.0833	0.0767	0.4499
35	1628.50	265.00	0.2650	5.7723	5.6734	0.0833	0.0639	0.3749
40	1625.50	262.00	0.2620	5.6956	5.5967	0.0833	0.0767	0.4499
45	1622.00	258.50	0.2585	5.6062	5.5073	0.0833	0.0894	0.5249
50	1618.00	254.50	0.2545	5.5040	5.4051	0.0833	0.1022	0.5998
55	1616.50	253.00	0.2530	5.4656	5.3667	0.0833	0.0383	0.2249
60	1614.00	250.50	0.2505	5.4017	5.3028	0.0833	0.0639	0.3749
70	1607.00	243.50	0.2435	5.2228	5.1239	0.1667	0.1789	0.5249
80	1601.00	237.50	0.2375	5.0695	4.9706	0.1667	0.1533	0.4499
90	1597.00	233.50	0.2335	4.9673	4.8684	0.1667	0.1022	0.2999
100	1591.50	228.00	0.2280	4.8267	4.7278	0.1667	0.1406	0.4124
110	1585.50	222.00	0.2220	4.6734	4.5745	0.1667	0.1533	0.4499
120	1582.00	218.50	0.2185	4.5840	4.4851	0.1667	0.0894	0.2624
130	1574.00	210.50	0.2105	4.3795	4.2806	0.1667	0.2044	0.5998
140	1566.00	202.50	0.2025	4.1751	4.0762	0.1667	0.2044	0.5998
150	1559.00	195.50	0.1955	3.9962	3.8973	0.1667	0.1789	0.5249
160	1553.00	189.50	0.1895	3.8428	3.7439	0.1667	0.1533	0.4499
180	1539.50	176.00	0.1760	3.4978	3.3989	0.3333	0.3450	0.5061
200	1630.50	167.00	0.1670	3.2678	3.1689	0.3333	0.2300	0.3374
220	1521.00	157.50	0.1575	3.0250	2.9261	0.3333	0.2428	0.3562
250	1505.00	141.50	0.1415	2.6162	2.5173	0.5000	0.4089	0.3999
280	1493.00	129.50	0.1295	2.3095	2.2106	0.5000	0.3067	0.2999
310	1482.50	119.00	0.1190	2.0411	1.9422	0.5000	0.2683	0.2624
340	1472.00	108.50	0.1085	1.7728	1.6739	0.5000	0.2683	0.2624
380	1460.00	96.50	0.0965	1.4661	1.3672	0.6667	0.3067	0.2249
420	1448.00	84.50	0.0845	1.1595	1.0606	0.6667	0.3067	0.2249
460	1439.00	75.50	0.0755	0.9295	0.8306	0.6667	0.2300	0.1687
470	1437.00	73.50	0.0735	0.8784	0.7795	0.1667	0.0511	0.1500
480	1435.00	71.50	0.0715	0.8272	0.7283	0.1667	0.0511	0.1500
490	1432.50	69.00	0.0690	0.7634	0.6645	0.1667	0.0639	0.1875
500	1430.50	67.00	0.0670	0.7122	0.6133	0.1667	0.0511	0.1500
510	1428.00	64.50	0.0645	0.6484	0.5495	0.1667	0.0639	0.1875
520	1427.00	63.50	0.0635	0.6228	0.5239	0.1667	0.0256	0.0750
540	1424.50	61.00	0.0610	0.5589	0.4600	0.3333	0.0639	0.0937
560	1422.50	59.00	0.0590	0.5078	0.4089	0.3333	0.0511	0.0750
580	1420.00	56.50	0.0565	0.4439	0.3450	0.3333	0.0639	0.0937
610	1417.50	54.00	0.0540	0.3800	0.2811	0.5000	0.0639	0.0625
640	1415.00	51.50	0.0515	0.3161	0.2172	0.5000	0.0639	0.0625
700	1411.50	48.00	0.0480	0.2267	0.1278	1.0000	0.0894	0.0437
760	1409.50	46.00	0.0460	0.1756	0.0767	1.0000	0.0511	0.0250
820	1408.00	44.50	0.0445	0.1372	0.0383	1.0000	0.0383	0.0187
880	1407.00	43.50	0.0435	0.1117	0.0128	1.0000	0.0256	0.0125
940	1406.50	43.00	0.0430	0.0989	0.0000	1.0000	0.0128	0.0062
1000	1406.50	43.00	0.0430	0.0989	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000

Tabla 4.3 Valores de la velocidad de secado de la prueba 2

tiempo(min)	Wt(g)	Wflor(g)	Wflor(kg)	Xt	X	Delta t(h)	DeltaX	R
0	1630 5	257 0	0 2670	6 1429	6 3862	0	0	0
5	1630 2	266 7	0 2667	6 1348	6 0781	0 0833	0 0080	0 0450
10	1628 9	265 4	0 2654	6 1001	6 0434	0 0833	0 0348	0 1949
15	1627 8	264 3	0 2643	6 0706	6 0139	0 0833	0 0294	0 1649
20	1627 1	263 6	0 2636	6 0519	5 9952	0 0833	0 0187	0 1049
25	1624 1	260 6	0 2606	5 9716	5 9149	0 0833	0 0803	0 4498
30	1622 6	259 1	0 2591	5 9315	5 8748	0 0833	0 0401	0 2249
35	1620 5	257 0	0 2570	5 8753	5 8186	0 0833	0 0562	0 3148
40	1618 2	254 7	0 2547	5 8138	5 7571	0 0833	0 0815	0 3448
45	1616 0	252 5	0 2525	5 7549	5 6982	0 0833	0 0589	0 3298
50	1614 2	250 7	0 2507	5 7068	5 6501	0 0833	0 0482	0 2699
55	1612 1	248 6	0 2486	5 6506	5 5939	0 0833	0 0562	0 3148
60	1610 5	247 0	0 2470	5 6078	5 5511	0 0833	0 0428	0 2399
70	1606 3	242 8	0 2428	5 4955	5 4388	0 1667	0 1124	0 3148
80	1602 5	239 0	0 2390	5 3938	5 3371	0 1667	0 1017	0 2848
90	1598 4	234 9	0 2349	5 2841	5 2274	0 1667	0 1097	0 3073
100	1594 5	231 0	0 2310	5 1798	5 1231	0 1667	0 1043	0 2923
110	1590 4	226 9	0 2269	5 0701	5 0134	0 1667	0 1097	0 3073
120	1586 5	223 0	0 2230	4 9658	4 9091	0 1667	0 1043	0 2923
135	1580 5	217 0	0 2170	4 8052	4 7485	0 2500	0 1605	0 2698
150	1574 6	211 1	0 2111	4 6474	4 5907	0 2500	0 1578	0 2948
165	1569 5	206 0	0 2060	4 5110	4 4543	0 2500	0 1364	0 2549
180	1563 7	200 2	0 2002	4 3558	4 2991	0 2500	0 1552	0 2898
200	1556 5	193 0	0 1930	4 1632	4 1065	0 3333	0 1926	0 2699
220	1545 4	181 9	0 1819	3 8662	3 8095	0 3333	0 2970	0 4160
240	1535 3	171 8	0 1718	3 5960	3 5393	0 3333	0 2702	0 3785
270	1523 1	159 6	0 1596	3 2697	3 2130	0 5000	0 3264	0 3048
300	1509 7	146 2	0 1462	2 9112	2 8545	0 5000	0 3585	0 3348
330	1498 6	135 1	0 1351	2 6142	2 5575	0 5000	0 2970	0 2774
360	1487 4	123 9	0 1239	2 3146	2 2579	0 5000	0 2996	0 2799
390	1474 0	110 5	0 1105	1 9561	1 8994	0 5000	0 3585	0 3348
420	1466 8	103 3	0 1033	1 7635	1 7068	0 5000	0 1926	0 1799
450	1459 6	96 1	0 0961	1 5709	1 5142	0 5000	0 1926	0 1799
480	1452 4	88 9	0 0889	1 3783	1 3216	0 5000	0 1926	0 1799
510	1446 6	83 1	0 0831	1 2231	1 1664	0 5000	0 1552	0 1449
540	1441 5	78 0	0 0780	1 0867	1 0300	0 5000	0 1364	0 1274
570	1436 5	73 0	0 0730	0 9529	0 8962	0 5000	0 1338	0 1249
600	1432 7	69 2	0 0692	0 8513	0 7946	0 5000	0 1017	0 0949
630	1427 0	63 5	0 0635	0 6988	0 6421	0 5000	0 1525	0 1424
660	1424 5	61 0	0 0610	0 6319	0 5752	0 5000	0 0669	0 0625
690	1420 5	57 0	0 0570	0 5249	0 4882	0 5000	0 1070	0 0999
720	1418 0	54 5	0 0545	0 4580	0 4013	0 5000	0 0669	0 0625
750	1415 2	51 7	0 0517	0 3831	0 3264	0 5000	0 0749	0 0700
780	1413 5	50 0	0 0500	0 3376	0 2809	0 5000	0 0455	0 0425
810	1411 9	48 4	0 0484	0 2948	0 2381	0 5000	0 0428	0 0400
840	1409 9	46 4	0 0464	0 2413	0 1846	0 5000	0 0535	0 0500
870	1408 7	45 2	0 0452	0 2092	0 1525	0 5000	0 0321	0 0300
900	1407 4	43 9	0 0439	0 1744	0 1177	0 5000	0 0348	0 0325
930	1406 0	42 5	0 0425	0 1370	0 0803	0 5000	0 0375	0 0350
990	1405 2	41 7	0 0417	0 1156	0 0559	1 0000	0 0214	0 0100
1050	1404 2	40 7	0 0407	0 0888	0 0321	1 0000	0 0268	0 0125
1110	1403 5	40 0	0 0400	0 0701	0 0134	1 0000	0 0187	0 0087
1170	1403 0	39 5	0 0395	0 0567	0 0000	1 0000	0 0134	0 0062
1230	1403 0	39 5	0 0395	0 0567	0 0000	1 0000	0 0000	0 0000

Tabla 4.4 Valores de la velocidad de secado de la prueba 3

Tiempo(min)	Wflor(g)	Wflor(kg)	Xt	X	Delta t(h)	Delta X	R
0	274.5	0.2745	6.1429	6.0630			
60	244.3	0.2443	5.3570	5.2771	1	0.7858	0.3772
120	214.1	0.2141	4.5712	4.4913	1	0.7858	0.3772
180	175.5	0.1755	3.5693	3.4894	1	1.0018	0.4809
240	151.5	0.1515	2.9422	2.8623	1	0.6271	0.3010
300	135.5	0.1355	2.5259	2.4460	1	0.4163	0.1998
360	97.4	0.0974	1.5345	1.4546	1	0.9914	0.4759
420	90.5	0.0905	1.3549	1.2750	1	0.1795	0.0862
480	69.9	0.0699	0.8189	0.7390	1	0.5360	0.2573
540	59.8	0.0598	0.5561	0.4762	1	0.2628	0.1262
600	53.0	0.053	0.3791	0.2992	1	0.1769	0.0849
660	50.5	0.0505	0.3141	0.2342	1	0.0651	0.0312
720	47.1	0.0471	0.2256	0.1457	1	0.0885	0.0425
780	44.6	0.0446	0.1606	0.0807	1	0.0651	0.0312
840	42.1	0.0421	0.0955	0.0156	1	0.0651	0.0312
900	41.7	0.0417	0.0851	0.0052	1	0.0104	0.0050
960	41.5	0.0415	0.0799	0.0000	1	0.0052	0.0025
1020	41.5	0.0415	0.0799	0.0000	1	0.0000	0.0000

Tabla 4.5 Valores de la velocidad de secado de la prueba 4

Tiempo(min)	Wflor(g)	Wflor(kg)	Xt	X	Delta t(h)	Delta X	R
0	268.5	0.2685	6.1429	6.0788	1	0.5374	0.2520
60	248.3	0.2483	5.6055	5.5414	1	0.6438	0.3019
120	224.1	0.2241	4.9617	4.8976	1	0.6119	0.2870
180	201.1	0.2011	4.3498	4.2857	1	0.5932	0.2782
240	178.8	0.1788	3.7566	3.6925	1	0.5507	0.2583
300	153.1	0.1531	3.2059	3.1418	1	0.4709	0.2208
360	140.4	0.1404	2.7350	2.6709	1	0.9790	0.4591
420	103.6	0.1036	1.7561	1.6920	1	0.3857	0.1809
480	89.1	0.0891	1.3703	1.3062	1	0.2847	0.1335
540	78.4	0.0784	1.0857	1.0216	1	0.2368	0.1110
600	69.5	0.0695	0.8489	0.7848	1	0.2208	0.1036
660	61.2	0.0612	0.6281	0.5640	1	0.1729	0.0811
720	54.7	0.0547	0.4552	0.3911	1	0.1197	0.0561
780	50.2	0.0502	0.3355	0.2714	1	0.1011	0.0474
840	46.4	0.0464	0.2344	0.1703	1	0.1224	0.0574
900	41.8	0.0418	0.1120	0.0479	1	0.0479	0.0225
960	40	0.04	0.0641	0.0000	1	0.0000	0.0000
1020	40	0.04	0.0641	0.0000	1	0.0000	0.0000

Los datos de peso se transformaron a contenido de humedad usando las ecuaciones A1 y A2 del apéndice A. El procedimiento de cálculo se indica detalladamente en el apéndice A. Estos datos se representaron gráficamente como el contenido de humedad en función del tiempo (ver Figs. 4.2 a la 4.5).

#### 4.5 Curvas de velocidad de secado

Para obtener las curvas de velocidad de secado se partió de los datos medios de humedad en función del tiempo medio de secado por medio de la ecuación A3 (ver apéndice A) (Geankoplis, 1995).

Las curvas se obtuvieron graficando la velocidad contra la humedad para obtener la humedad crítica y contra el tiempo para obtener el tiempo crítico de secado. Estas gráficas son representadas en las figuras 4.6 a la 4.12.

#### 4.6 Resultados experimentales

Los resultados experimentales obtenidos de las pruebas de secado están reportados en la Tabla 4.6; estos parámetros sirvieron para la selección del equipo, así como para la evaluación de prefactibilidad económica.

**Tabla 4.6** Datos finales de las cuatro corridas de secado

<b>CORRIDA</b>	<b>R cte.</b>	<b>HUMEDAD CRÍTICA kg H<sub>2</sub>O/kg SS</b>	<b>TIEMPO CRÍTICO (min)</b>	<b>HUMEDAD INICIAL</b>	<b>HUMEDAD FINAL</b>
1	0.4321	2.66	248	86%	9%
2	0.3060	2.25	285.7	86.8%	10.8%
3	0.3603	1.76	333.33	86.5%	10.7%
4	0.2742	2.70	340	86.6%	10%
<b>PROMEDIO</b>	0.3431	2.34	301.7	86.5%	10.1%

Es importante mencionar que no existe un conjunto normalizado de pruebas sistematicas de laboratorio, en las que se utilicen equipos normalizados que suministren datos claves sobre las características de secado en los materiales; sin embargo, la información obtenida en las pruebas de secado realizadas en el laboratorio, junto con la descripción del equipo utilizado, sirvieron como base inicial para la discusión del secado eficiente y óptimo para el cempasúchil.

En el siguiente capítulo se analizó técnica y económicamente la selección del secador con base en los siguientes datos:

- Las cantidades en el diagrama de flujo
- Los aspectos físicos y químicos del cempasúchil a la alimentación
- Las especificaciones del producto seco

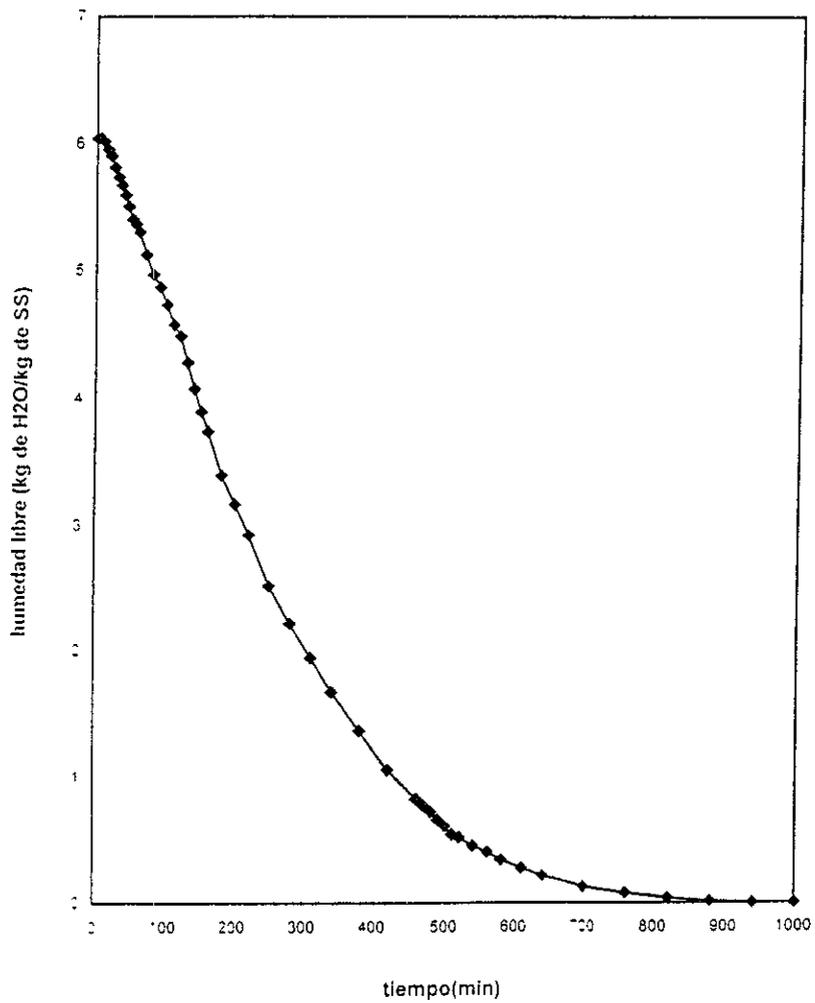


Fig. 4.2 Curva de secado: Contenido de humedad en función del tiempo de secado Prueba 1

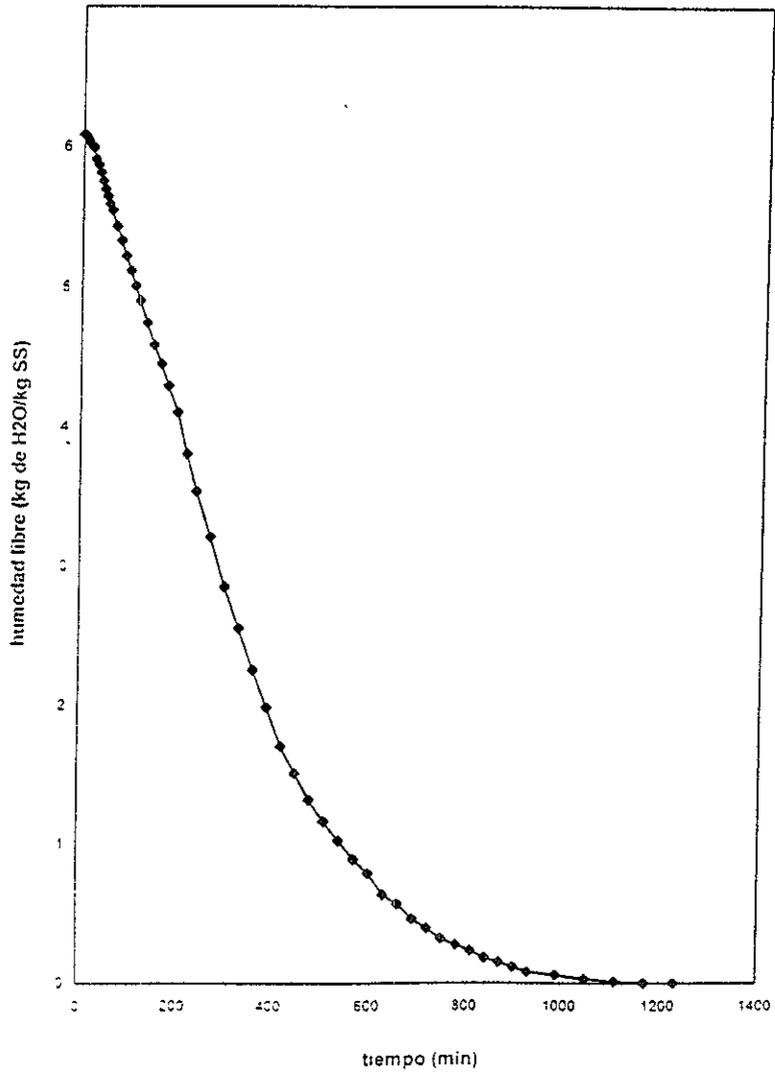


Fig. 4.3 Curva de secado: Contenido de humedad en función del tiempo de secado. Prueba 2

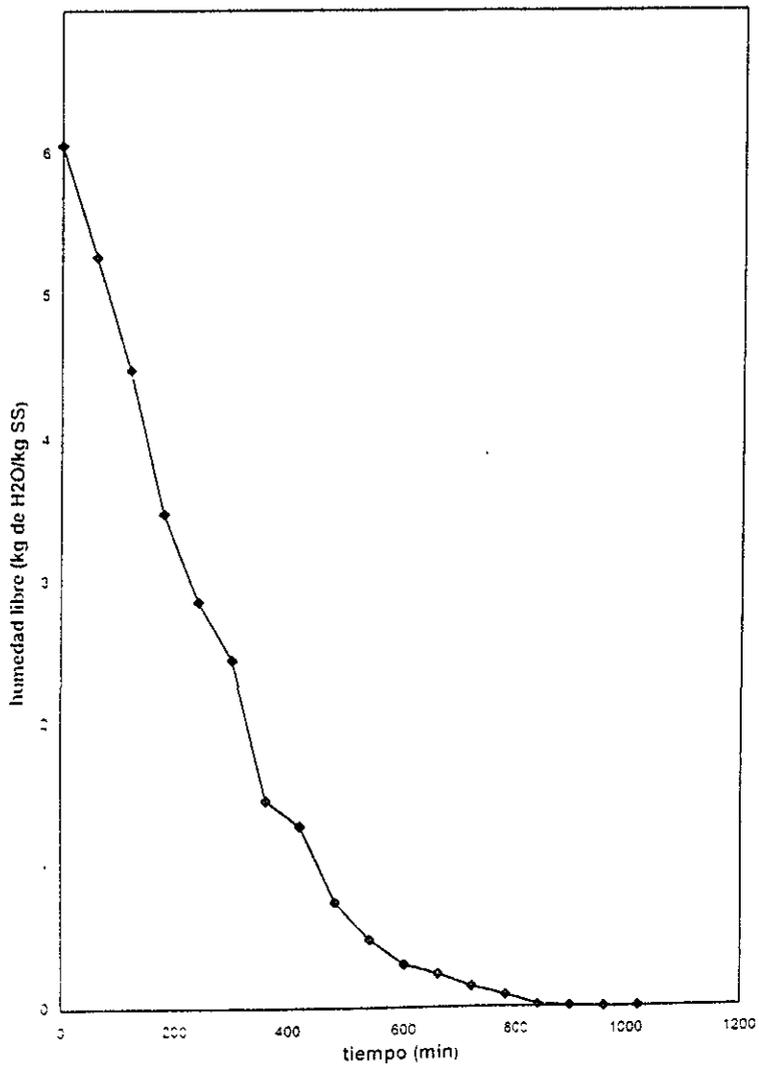


Fig. 4.4 Curva de secado: Contenido de humedad en función del tiempo de secado. Prueba 3

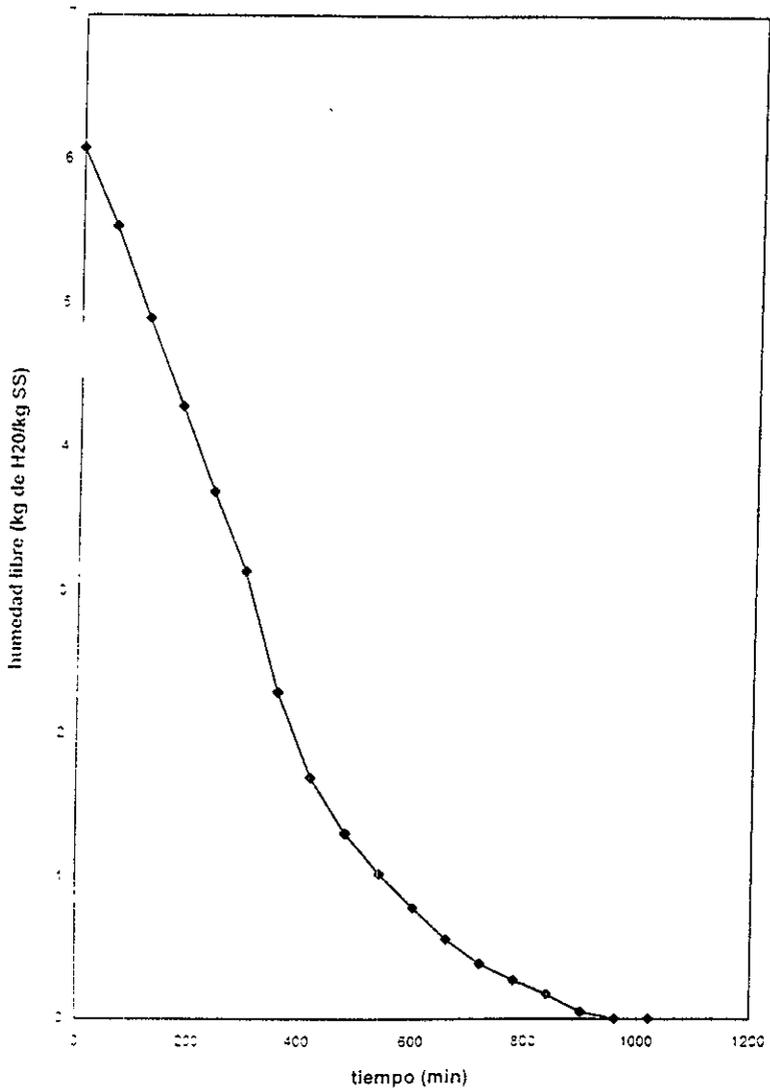


Fig. 4.5 Curva de secado: Contenido de humedad en función del tiempo de secado. Prueba 4

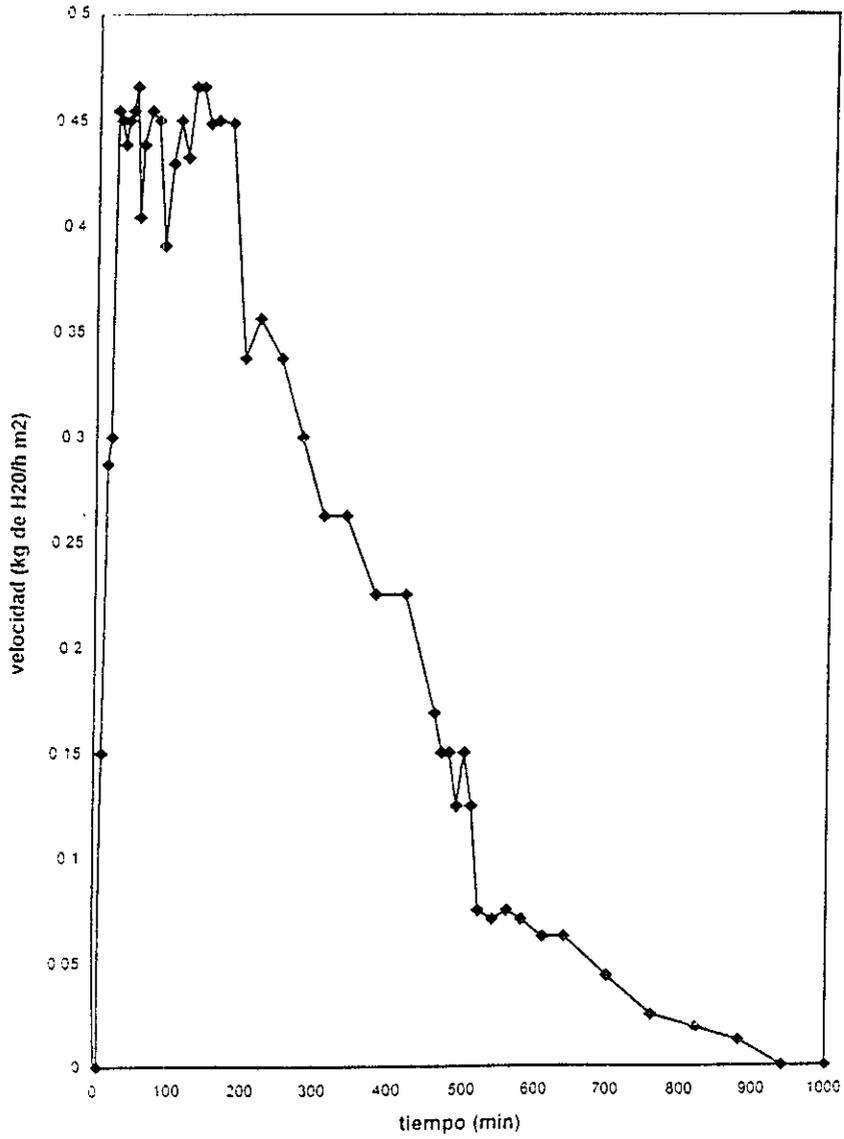


Fig. 4.6 Curva de secado: Velocidad de secado en función del tiempo de secado. Prueba 1

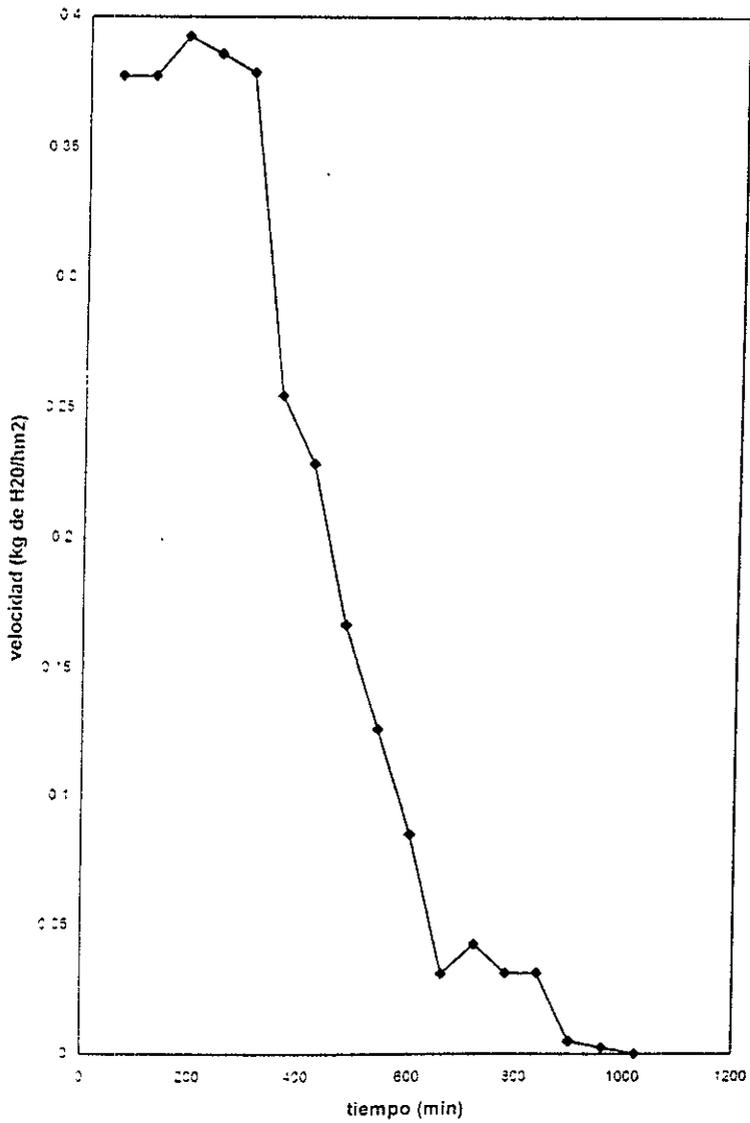


Fig. 4.7 Curva de secado: Velocidad de secado en función del tiempo de secado. Prueba 2

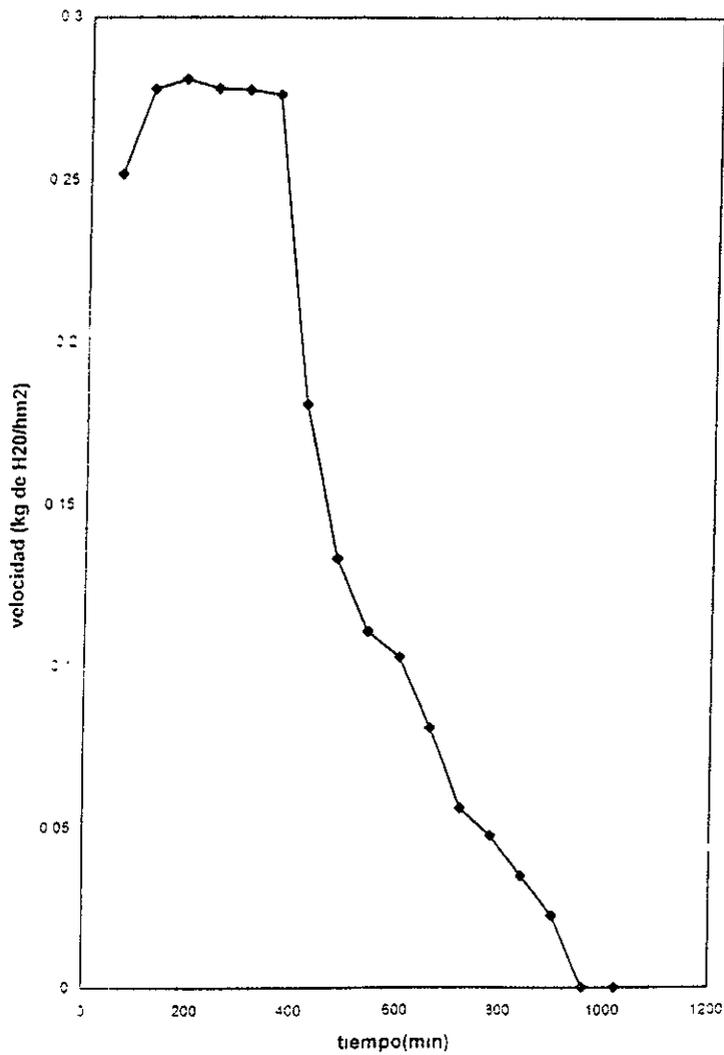


Fig. 4.8 Curva de secado: Velocidad de secado en función del tiempo de secado. Prueba 3

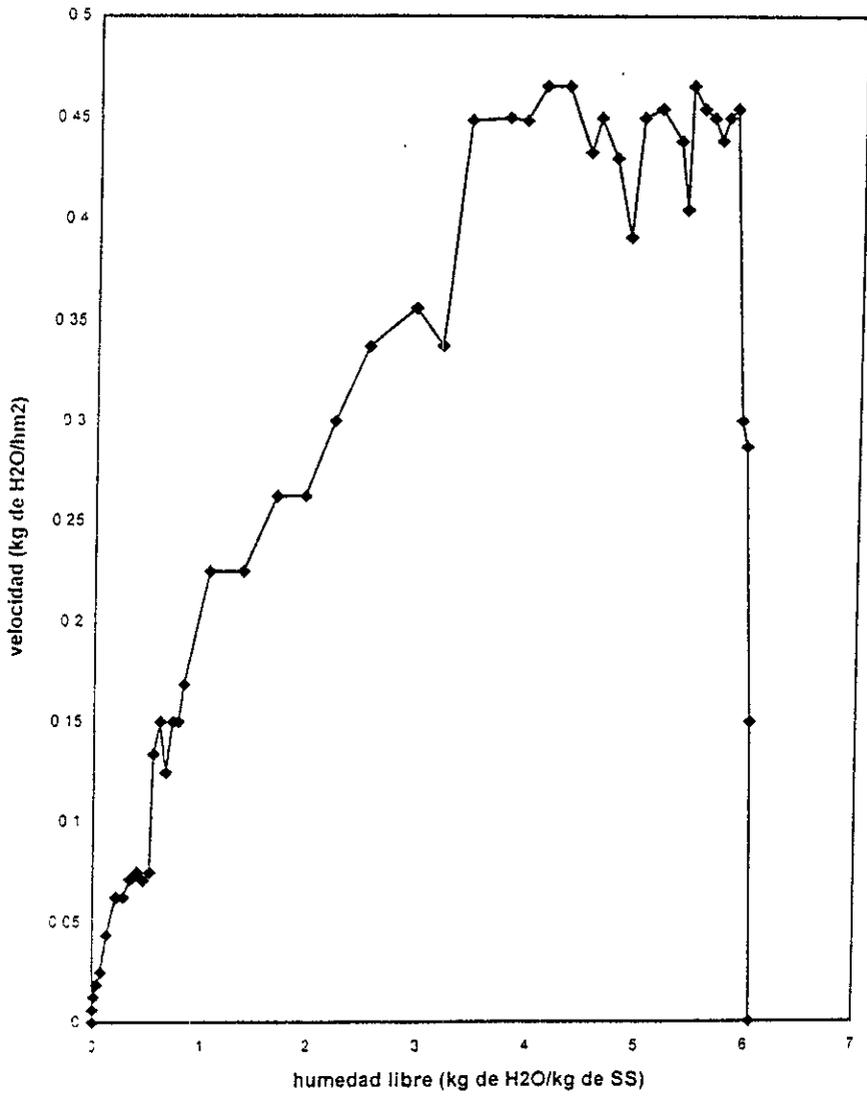


Fig. 4.9 Curva de secado: Velocidad de secado en función de la humedad libre. Prueba 1

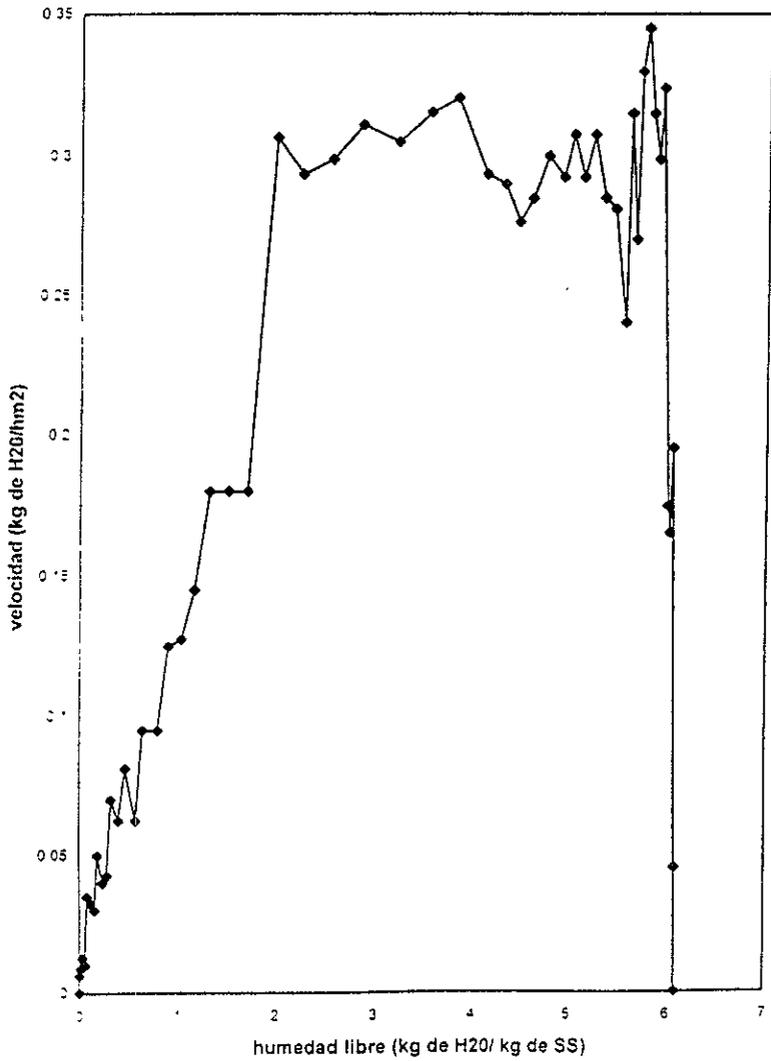


Fig. 4.10 Curva de secado: Velocidad de secado en función de la humedad libre. Prueba 2

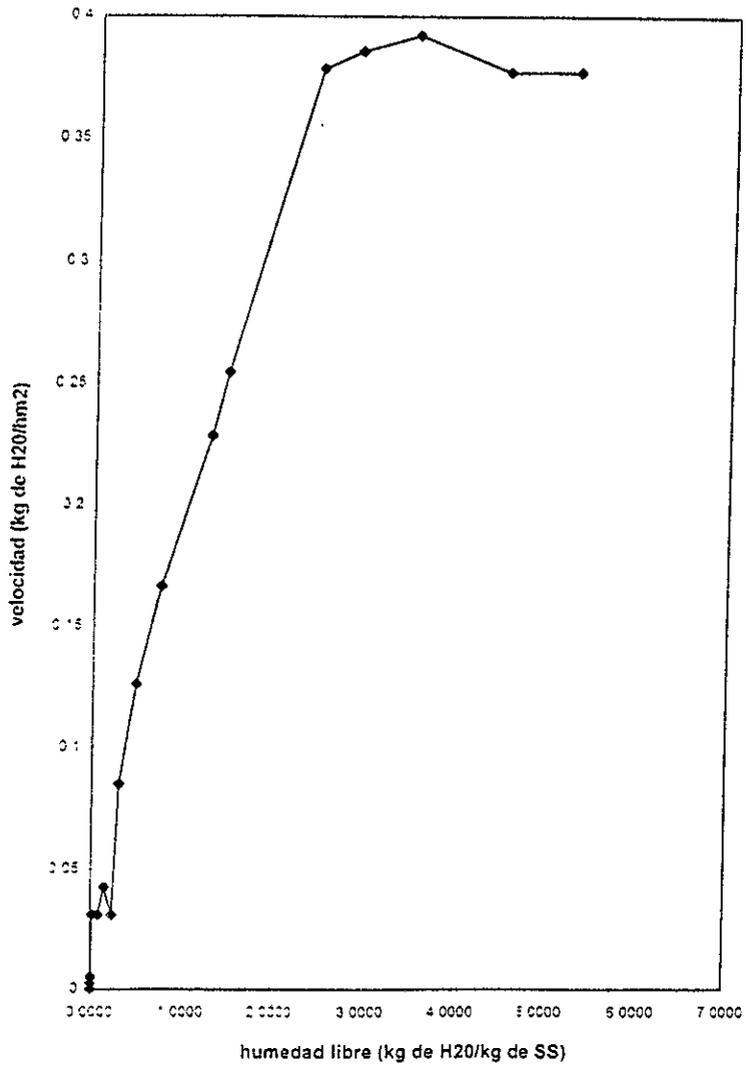


Fig. 4.11 Curva de secado: Velocidad de secado en función de la humedad libre. Prueba 3

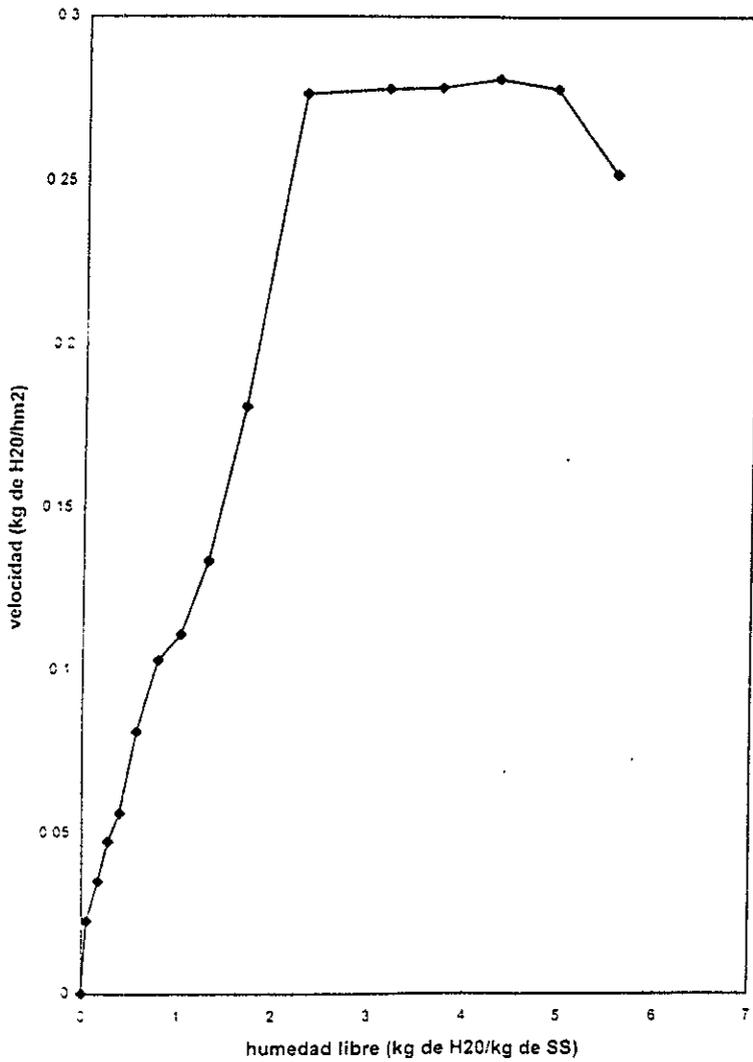


Fig. 4.12 Curva de secado: Velocidad de secado en función de la humedad libre. Prueba 4

## CAPÍTULO 5

### SELECCIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL SECADOR

#### 5.1 Selección preliminar técnica

La tarea de elegir el secador capaz de cumplir con los requerimientos de producción y calidad partiendo de una materia prima con ciertas características de humedad, no es fácil para el ingeniero de proceso, debido a que en el mercado de equipos para la industria química existen muchos tipos de secadores, cada uno diseñado para su propia especialidad y algunos de ellos muy versátiles para secar más de un tipo de material. Sin embargo, la elección de un secador se reduce a decidir entre no más de tres tipos, con base en su rendimiento y la economía de cada uno de ellos.

La selección de un secador no puede reducirse a fórmulas matemáticas ya que puede tenerse toda la información necesaria por la cantidad de suposiciones que es necesario hacer, sino que debe considerarse la experiencia previa para cada proceso en particular. Esta información deberá obtenerse, ya sea de la literatura o de los fabricantes de equipos de secado a los que se consulta una vez que se ha investigado el secado característico del material en un laboratorio o planta piloto, con lo cual se procede a efectuar la selección preliminar y, posteriormente, la selección final (Coulson-Richardson, 1983).

Para llevar a cabo la selección preliminar de los secadores a los que se evaluó técnica y económicamente, se tomaron en cuenta algunas de las características, tanto del proceso como del material a secar que se consideraron importantes, tales como:

- El método de operación (realizar el secado por convección)
- La escala de producción (altos volúmenes de producción)
- La forma física de la alimentación (p. ej; manejar materiales fibrosos con gran contenido de agua)
- Aspectos especiales (materiales termosensibles y/o con tendencia a oxidarse)

Se recurrió a las tablas de clasificación de secadores presentadas en el capítulo 3 para decidir cuál de ellos cumple con las necesidades del proceso.

## 5.1.1 Criterios de selección y comparación de secadores

### Operación continua o discontinua

Los secadores continuos en general son preferibles, ya que requieren de menos mano de obra, combustible y se integran más fácilmente dentro de un proceso, además de que el producto obtenido a la descarga es más uniforme y los costos unitarios de secado son menores que los de una operación discontinua.

Los secadores discontinuos tienen como ventajas costo inicial bajo, menor costo de mantenimiento, fácil operación y versatilidad, ya que pueden manejar más de un producto a la vez, por lo que se prefieren los secadores discontinuos cuando el material a secar es relativamente poco y requiere de un tiempo de permanencia largo.

La cantidad de materia prima por secar es otro criterio de considerable importancia ya que si se requieren cantidades mínimas, el costo de una operación intermitente será menor que el de un secador continuo. Como regla general, se considera que en producciones menores de 5,000 kg/día se manejan con mejor eficiencia los secadores discontinuos y para producciones arriba de 50,000 kg/día se utilizan los secadores continuos (Keey, 1972).

### Calor directo o indirecto

Siempre que sea posible es preferible el calor directo, por varias razones. Cuando el material es calentado principalmente por convección, la temperatura puede ser controlada, asegurando que el material nunca sea calentado arriba de su temperatura especificada como temperatura máxima, ya que la temperatura máxima que alcanza el sólido es la temperatura de bulbo húmedo, la cual raramente excede 70°C. Además, el calentamiento directo es más económico que el indirecto ya que este último tiene la inconveniencia de que utiliza enchaquetamientos o tubos por donde pasa el flujo de calor.

Sin embargo, también tiene sus desventajas el calentamiento directo. Entre ellas se encuentra una pobre eficiencia térmica, la circulación de aire puede levantar partículas finas teniendo como consecuencia pérdida de material y la generación de algunos problemas ambientales. Afortunadamente, esto se puede eliminar elevando la eficiencia térmica, recirculando una fracción del aire y el polvo puede ser disminuido reduciendo la velocidad del aire o recolectando la materia en ciclones o filtros de bolsa; estas soluciones traen consigo un aumento en el costo del secador resultando en algunas cosas más económico el calentamiento indirecto.

El proceso de elaboración de harina de cempasúchil maneja una carga de 200,000 kg/día aproximadamente, por lo que los secadores de estudio deberán ser continuos y con transferencia de calor por convección para eliminar mejor la humedad. Por ello, el método que se utilizó para la obtención de datos experimentales fue de este tipo. Deben cumplir además con la característica de manejar sólidos fibrosos enteros o molidos que contienen gran

cantidad de agua, así como considerar los aspectos especiales de termosensibilidad y oxidación resumidos en la tabla 5.1.

Partiendo de la información anterior y observando la tabla 3.3 que clasifica los secadores según la escala de producción atendiendo al hecho de que en este proceso se producen 28 ton de ss/d, se puede considerar que esta producción cae dentro de la clasificación de una escala media a una gran escala en ton/h, de tal forma de que la tabla indica utilizar secadores continuos.

**Tabla 5.1** Características del proceso de obtención de harina de *cempasúchil* (Casarrubias y Hernández, 1996)

Alimentación	200 ton de flor fresca/d
Forma de alimentación	Flores enteras
Contenido de agua en la entrada	De 85 a 99%
Tipo de material	Clasificado como fibroso
Aspectos especiales	Material termosensible, sufre oxidación
Producción	28 Ton de SS/día
Contenido de agua a la salida	10.1%

Dentro de esta clasificación caben:

- Secador rotatorio indirecto
- Secador neumático
- Secador rotatorio directo
- Secador de lecho fluidificado
- Secador de banda (túnel)
- Secador de bandeja (túnel)

A continuación se hace la selección con base en el método de operación (tabla 3.1), tomando en cuenta que ya se eligió una característica (la de ser un equipo continuo) lo cual reduce apreciablemente las opciones de esta tabla, procediendo a elegir la segunda característica del sistema utilizando un método de operación por convección por ser ésta la forma en que puede eliminarse la humedad de manera mas eficiente y, por ello, así se obtuvieron los datos experimentales, quedando los siguientes equipos:

- Secador neumático
- Secador de lecho fluidificado
- Secador rotatorio directo
- Secador de banda (túnel)
- Secador de bandejas (túnel)

Esta tabla también muestra el tipo de material que cada equipo maneja, lo que lleva a fijar la tercer característica del sistema, el tipo de material. Para ello se tomó como base la tabla 3.2 que clasifica a los secadores de acuerdo a la alimentación.

En este proceso, el material está clasificado como del tipo fibroso; consecuentemente, los equipos capaces de manejar este material son:

- Secador de bandejas al vacío
- Secador de bandejas (túnel)
- Secador de cuba con circulación transversal
- Secador de lecho fluidificado
- Secador rotatorio indirecto
- Secador neumático
- Secador rotatorio directo
- Secador de banda (túnel)

Por último, basándose en los aspectos especiales que presenta el material, se fijó la cuarta característica que restringe el uso de secadores para materiales termosensibles que sufren oxidación.

Con base en la tabla 3.4, se tiene como posibles equipos:

Manejan materiales termosensibles:

- Secador discontinuo agitado
- Secador de lecho fluidificado
- Secador de banda al vacío
- Secador neumático

Manejan materiales oxisensibles:

- Secador de bandejas al vacío
- Secador de banda al vacío
- Secador pulverizador

Debido a que existen equipos que solo cumplen con unas de las características del proceso, se elaboró una tabla matriz para llevar a cabo la eliminación de éstos, eligiéndose solo los más adecuados (Tabla 5.2 ).

**Tabla 5.2** Tabla matriz

<b>Secador</b>	<b>Continuo</b>	<b>Convección</b>	<b>Material fibroso</b>	<b>Material termosensible</b>	<b>Material oxisensible</b>
Discontinuo agitado				X	
Lecho fluidificado	X	X	X	X	
Banda al vacío				X	X
Neumático	X	X	X	X	
Bandejas al vacío					X
Pulverizador	X	X			X
Bandejas	X	X	X		
Cuba con circulación transversal			X		
Rotatorio indirecto	X		X		
Rotatorio directo	X	X	X		
Banda	X	X	X		

De esta tabla matriz (tabla 5.2) puede verse que los equipos que cumplen con la mayoría de las características son:

- Secador de lecho fluidificado
- Secador neumático
- Secador de bandejas (túnel)
- Secador de banda (túnel)
- Secador rotatorio directo

Estos cinco secadores se pueden clasificar según la información recopilada en la literatura, en tres tipos de operación característica.

Secado por suspensión y arrastre de partículas en la corriente gaseosa

- a) Secador de lecho fluidificado
- b) Secador neumático

Secado en lecho fijo a través de un túnel

- a) Secador de banda
- b) Secador de bandejas

Secado por caída libre a través de una corriente de gas caliente

- a) Secador rotatorio directo

## **5.2 Descripción de los secadores preseleccionado**

Para poder seleccionar correctamente el equipo de secado se describirán someramente sus características.

### **5.2.1 Secador neumático**

La operación para establecer contacto entre el gas y los sólidos en el cual la fase sólida existe en una condición diluida se denomina sistema neumático. Recibe este nombre porque en la mayoría de los casos, la cantidad y la velocidad del gas son suficientes para levantar y transportar los sólidos que se oponen a la fuerza de gravedad. Los secadores neumáticos se distinguen porque la resistencia de una partícula dada de sólidos en el sistema es, en promedio, muy breve, casi siempre con una duración no más de unos cuantos segundos. Esto significa que no se puede controlar el sistema por difusión. No es necesario retener entre corridas ninguna cantidad residual de sólidos parcialmente procesados o de gas.

Por estas razones, el equipo neumático es muy apropiado para procesar materiales sensibles al calor, fácilmente oxidables, explosivos o inflamables que no se pueden exponer durante largos períodos de tiempo a las condiciones del proceso. La circulación del gas y de los sólidos es, por lo común, de corriente paralela, el método de contacto entre el gas y los sólidos se describe mejor si se especifica que se trata de una circulación directa.

### **Descripción del proceso del secado neumático**

En este tipo de equipos, el sólido se seca mientras es arrastrado por la corriente del gas caliente el cual generalmente es aire. El secado se da en el tubo vertical por donde fluye el aire caliente con una velocidad mayor de la caída libre de las partículas de mayor tamaño de la alimentación húmeda, la cual es introducida por el pie del tubo mediante un alimentador adecuado. En la práctica, este alimentador es una rueda de paletas que lanza al sólido dentro del tubo de secado en dirección vertical y aproximadamente por el centro del tubo, las aglomeraciones del material se rompen mientras que las partículas pequeñas se desintegran rápidamente a medida que se secan. La evaporación de la humedad superficial se lleva a cabo básicamente a la temperatura de bulbo húmedo del aire. Cuando esta operación concluye, que es el momento en que el aire se habrá enfriado de un modo notable, la película de humedad superficial evita que la temperatura de los sólidos sobrepase a la de bulbo húmedo del aire. Las características de la alimentación se pueden mejorar a menudo recirculando una porción de material seco (Nonhebel, 1979).

En el extremo superior del tubo se recoge el material seco por medio de un ciclón, donde la velocidad de salida está entre 8 y 30 m/s, el ciclón es seguido por un filtro de bolsa o por un separador electrostático que previene la emisión de polvo con el aire efluente. En los secadores grandes se emplean dos ventiladores, de manera que se hace despreciable la diferencia de presión en el punto de la alimentación ya que es un inconveniente tener ahí una fuga tanto hacia adentro como hacia afuera.

La capacidad de evaporación volumétrica se ha encontrado generalmente en el intervalo de 10 a 200 kg/hm<sup>3</sup>, los requerimientos térmicos y de potencia están, respectivamente, entre 4.6 megajoules y 0.02 a 0.05 kW/h por kilogramo de agua evaporada (Keey, 1972). Según sea la sensibilidad del producto en relación con la temperatura, se utilizan temperaturas del aire de entrada que oscilan entre 150 y 700°C. Cuando se trata de sólidos sensibles al calor, el alto contenido inicial de humedad debe permitir el uso de una temperatura más elevada del aire de entrada.

Los transportadores neumáticos se usan para sólidos que tienen contenidos iniciales de humedad que varían de 3 a 90%, en base húmeda. La cantidad de aire necesario y la carga de sólidos a gas se fijan de acuerdo con la carga de humedad, la temperatura del aire a la entrada y, con frecuencia, la humedad del aire de salida. En un secador sencillo como el descrito, el tiempo de residencia de una partícula en el tubo de secado es del orden de 0.5 a 3.0 segundos.

La mayoría de los secadores comerciales poseen un sistema de recirculación del material con el objeto de aumentar el tiempo de residencia promedio de las partículas hasta alcanzar el valor de 1 minuto aproximadamente (Nonhebel, 1979).

### Ventajas

- Un tiempo de contacto muy corto y flujo en corriente lo que permite muchas veces obtener un secado satisfactorio de materiales termosensibles.
- Se pueden usar altas temperaturas de entrada y bajos flujos de aire, con lo que resulta un rendimiento térmico alto.
- El secador transporta al sólido de manera que su uso puede evitar la necesidad de poner un equipo adicional de transporte.
- El secador requiere poca superficie de planta y puede estar instalado en la intemperie; sin embargo, el último colector de polvo debe encontrarse en un recipiente calentado para prevenir la formación de rocío con la consiguiente deposición de polvo y taponamiento de los filtros de bolsas si los hay.
- Tiene muy pocas partes móviles de manera de que sus necesidades de mantenimiento son bajas. Su costo es bajo comparado con otros tipos de secadores.

### Desventajas

- Pueden aparecer dificultades al momento de operar el equipo si la alimentación contiene una gran proporción de aglomerados que dificulten la dispersión del sólido.
- En general, las partículas no reciben el mismo tratamiento, especialmente en los secadores con recirculación, lo cual puede ser una desventaja en algunos casos.

## **5.2.2 Secador continuo de bandejas**

Este tipo de secadores son una modificación de los secadores de bandejas atmosféricos discontinuos y los secadores de banda. Existen varios arreglos para los secadores de túnel

como son circulación transversal y circulación paralela; sin embargo, para la deshidratación de vegetales se acostumbra montar dos túneles de igual longitud lado a lado con ventiladores para cada unidad, los carros se mueven a través del primer túnel en dirección paralela con el flujo de aire, al final del primer túnel dan vuelta para ingresar al segundo túnel donde se mueven en contracorriente con el aire, el tiempo de residencia es el mismo en los dos túneles, la electricidad requerida es de  $1 \text{ kW/m}^2$  y de vapor  $2.5$  a  $3.5 \text{ kg/kg H}_2\text{O}$  evaporada, la capacidad evaporativa es de  $0.1$  a  $1 \text{ kg/hm}^2$  y las temperaturas del aire son entre  $30$  y  $90^\circ\text{C}$ . Los túneles pueden soportar una capacidad de cincuenta carros de dos metros de largo.

El uso de pilas de bandejas móviles en flujo paralelo tiene el inconveniente de que no es técnicamente fácil disponer la circulación de aire de modo satisfactorio puesto de que no puede ser soplado a través de las bandejas. Esta es la consecuencia de pretender ahorrar espacio.

La forma más común es de túnel continuo pero estos se utilizan para materiales que requieren poco secado efectuado bajo condiciones controladas. El sistema de secado con bandejas con circulación transversal tiene como ventajas un costo de capital bajo y pérdidas de calor reducidas. Sin embargo, una gran desventaja es que al gas de secado, que se sopla a través de la serie de bandejas, no se le puede practicar el recalentamiento entre las bandejas, de tal forma de que se reduce el coeficiente total de secado y la producción por unidad de área perforada es menor que en un secador de banda.

### **Descripción del proceso del secado con bandejas**

El material se carga en las bandejas que se colocan sobre bastidores los que a su vez son introducidos en el túnel de secado sobre una cinta transportadora de cadena o listones que los van moviendo muy lentamente a través de la cámara sobre la cual circula el gas de secado. En la práctica, el uso de las bandejas permite la posibilidad de una construcción más compacta y, por lo tanto, más económica.

El secado se realiza con aire caliente u otro gas soplado sobre las bandejas mediante uno o varios ventiladores. En algunos casos, las bandejas están perforadas y el aire de secado pasa a través del material que está sobre ellas. A veces, circula el aire por convección natural o se pueden utilizar distintos dispositivos para la distribución y circulación del aire. La cámara de secado se construye de algún material conveniente como acero y ladrillos, láminas de asbesto, aluminio, etc; de manera similar, las bandejas pueden ser de acero, acero esmaltado, acero austenítico, aluminio, vidrio, plástico, etc.

Generalmente el calor se suministra mediante vapor de agua o agua caliente que circula por serpentines dispuestos dentro y fuera del compartimiento de secado. A veces se usa calefacción eléctrica, gas, petróleo o gases de combustión.

Esta clase de secadores es útil para casi cualquier tipo de material, su costo operativo es alto debido a que el trabajo requerido es relativamente grande, la limpieza es fácil reduciéndose a

veces al lavar las bandejas fuera del secador. En caso de necesidad, es fácil construirlas de materiales resistentes a la corrosión.

### Equipos auxiliares

Entre los equipos auxiliares se encuentran los conjuntos de bastidores y bandejas que se necesitan para poder cambiar fácilmente de un producto a otro, vehículos para mover los bastidores con bandejas hacia y desde el secador, equipos especiales para la carga uniforme cuando se trata de pastas dentro de las bandejas y zonas especiales con corrientes de aire (que sirven para quitar el polvo) para la descarga del producto seco de las bandejas. También son necesarios equipos para el lavado de bandejas entre diferentes operaciones o al cambiar de producto.

#### **1.- Bastidor normalizado**

Son fabricados en acero dulce tubular de 4 cm, sus dimensiones son 92.5 cm de largo x 80.1 cm de ancho y 152.5 cm de altura, tiene espacio para alojar 40 charolas dispuestas en 2 columnas de 20 filas cada una. Las dimensiones de las bandejas son 80 cm de largo x 40 cm de ancho x 3 cm de altura y con un espacio de 7.5 cm entre cada una (Nonhebel, 1979).

#### **2.- Aparejos para el movimiento de bastidores**

Un bastidor normal completamente cargado puede pesar más de media tonelada por lo que se deben proveer medios para moverla. En la práctica se utilizan vehículos elevadores operados a mano o por un motor que puede introducirse bajo el bastidor para moverlo. El vehículo es retirado luego de haber situado el bastidor en el secador. Este sistema se aplica en bastidores normalizados por ser simple y flexible. Otra forma, es montar los bastidores sobre ruedas "pivotantes" de manera que puedan ser empujados. Esto no es mecánicamente muy satisfactorio y aumenta el costo del bastidor.

### Ventajas

- El secador de bandejas con circulación transversal ofrece la posibilidad de una disposición compacta con un costo de capital bajo y reducidas pérdidas de calor, otra ventaja es la fácil limpieza de las bandejas ya que se realiza como una operación separada.
- El secador de bandejas con circulación paralela (bandeja maciza) es muy fácil de limpiar y muy útil para el secado de diferentes productos.

### Desventajas

- Con circulación transversal, el gas de soplado que sopla a través de la serie de bandejas no se le puede practicar el recalentamiento, lo que reduce el coeficiente total de secado y la producción por unidad de área perforada es menor.
- Con circulación paralela no es fácil disponer la circulación de aire de modo satisfactorio, puesto que no puede ser soplado bien a través de las bandejas.

### **5.2.3 Secador rotatorio continuo**

En un secador rotatorio continuo, el material húmedo es continuamente elevado por la rotación del secador y dejado caer a través de una corriente de aire caliente que circula a lo largo de la carcasa del secador. El flujo de aire puede ser, tanto en favor de la corriente como en contracorriente. Los secadores de gran tamaño poseen un enfriador del producto, que opera en base al mismo principio y con aire en contracorriente o en un enfriador de lecho fluidificado.

El secador rotatorio constituye una de las formas más ampliamente utilizadas para el secado continuo. Es sencillo y razonablemente versátil y, en consecuencia, es adecuado para el secado de una amplia gama de materiales, en forma rápida y con un bajo costo unitario cuando se trata de grandes cantidades. Se pueden diseñar estos secadores para tiempos de secado comprendidos entre 5 y 60 minutos y capacidad de secado desde unos pocos cientos de kilogramos por hora hasta alcanzar las 200 ton/h.

Los secadores rotatorios son muy adecuados para el secado de productos granulares, con buenas características de flujo que requieren tiempos de secado moderados. Pueden ser adaptados para manipular materiales algo pegajosos mediante dispositivos especiales que disgreguen las costras sólidas formadas. De hecho, la acción de volcado es beneficiosa dentro de ciertos límites para todos los productos, pues se rompe la corteza semipermeable que se forma en la superficie de las partículas que se secan, con lo cual se facilita la salida de la humedad desde el interior de las partículas.

Los secadores rotatorios son también muy adecuados para el secado de materiales termosensibles, en los casos en que una restricción en la temperatura de secado no implique de que el tiempo de secado tenga que ser muy prolongado.

#### **Descripción del proceso del secador rotatorio continuo**

El secador rotatorio consiste en un cilindro de aproximadamente 3m de diámetro que gira sobre cojines apropiados y, por lo común tiene una leve inclinación en relación con la horizontal. La longitud del cilindro varía de 4 a más de 10 veces su diámetro (Keey, 1972).

Los sólidos que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él, debido a la rotación, el efecto de la carga y la pendiente del cilindro y se descargan por el otro extremo como producto acabado. Unidas a la pared interna del cilindro del secador hay una serie continua de elevadores. A medida que gira el secador, estos elevadores toman el material y lo arrojan en cascada dentro de la corriente gaseosa.

El secador gira a una velocidad de 4 a 5 rev/min. La velocidad del aire varía de 1.5 a 2.5 m/s, dependiendo del tamaño de las partículas a secar y de la cantidad de polvo fino formado dentro del secador. Los gases que circulan por el cilindro pueden reducir o aumentar la velocidad de movimiento de los sólidos, según que la circulación del gas sea a contracorriente o siga una corriente paralela con la circulación de los sólidos.

## Equipos auxiliares

En los equipos rotatorios de calor directo se necesita una cámara de combustión para temperaturas elevadas, y serpentines de vapor con aletas para temperaturas bajas. Si se desea evitar la contaminación del producto con los gases de combustión en las unidades de calor directo, se pueden usar calentadores de aire indirecto que usen gas o petróleo para alcanzar las temperaturas que excedan la de vapor disponible.

## Parámetros

Es fundamental usar el flujo de aire y sólido en favor de la corriente cuando se debe evaporar una gran proporción de humedad en las primeras etapas del secado; además, esto permite utilizar altas temperaturas en el aire de entrada sin alcanzar altas temperaturas en el producto a secar. Por ello, es indicado para el secado de materiales termosensibles, incluyendo aquellos que contienen componentes volátiles. La operación en contracorriente se indica cuando es necesario calentar el sólido a una temperatura relativamente alta para completar el proceso de secado.

## Usos

En la industria química su mayor uso es el secado de sales fertilizantes, como el sulfato, el nitrato y fosfato de amonio, sales de potasio y fertilizantes compuestos del tipo NPK, alcanzando la producción mundial de estos. En la industria azucarera son muy empleados para secar los cristales de azúcar. Hay algunas fábricas de harina de cempasúchil que poseen este tipo de secadores.

### **5.2.4 Secador de banda**

Un método satisfactorio de acarreo de material es por bandas las cuales pueden construirse de malla, tablillas o de metal delgado, estas máquinas están construidas con un alto grado de precisión.

Los secadores de banda perforada son generalmente construidos para trabajar en forma modular, el tipo de operación en cada sección puede ser independiente lo que le da una gran flexibilidad, permitiendo posibles expansiones.

Cada sección cubre un área de 1 a 5 m<sup>2</sup> y los secadores comerciales disponibles cuentan con 20 secciones. El aire pasa a través del material a velocidades entre 0.6 y 1.4 m/s y el 60 al 90% del mínimo es reciclado por los ventiladores de cada sección, el lecho es de 12 a 50 mm y la temperatura de entrada puede llegar a ser hasta de 300°C. La potencia necesaria en cada unidad por los ventiladores es de alrededor de 1 kW/m de banda y la capacidad de evaporación depende de la carga de material sobre la banda, generalmente, entre 4 a 50 kg hm<sup>2</sup>.

El secador de banda simple es usado satisfactoriamente en alimentos y minerales con un tamaño de partícula de 3 a 25 mm, los materiales que requieren grandes tiempos de secado tales como los vegetales y las frutas son secados en unidades múltiples. Se debe tener cuidado de mantener alineado el marco de banda para que no se presente problemas de desgaste y mantenimiento excesivo.

### Desventajas

- Sobre la banda se produce un pequeño desgaste del material que se está secando y el polvo generado se asienta en la banda y, eventualmente, puede llegar a taponarla; bajo estas circunstancias, es extremadamente difícil limpiar la banda de tablillas.
- Estos secadores no se pueden utilizar a temperaturas muy altas aunque el material lo permita, pues las pérdidas de calor tienden a ser grandes cuando la temperatura es muy alta.
- Incrementar la velocidad del aire para incrementar la velocidad de secado, trae como consecuencia pérdida de material, pérdida de carga y formación de polvo.

### Ventajas

- Ofrece secado rápido y eficiente
- Mínima perturbación del producto
- Conveniente para operar con materiales termosensibles.

### **5.2.5 Secador de lecho fluidificado**

En el secado de la mayoría de los productos químicos, la cantidad de aire requerida a la temperatura máxima admisible es tan grande que no sería económico el tamaño del equipo debido a la gran sección transversal necesaria para asegurar una fluidificación regular. Por ello es mejor usar lechos con un burbujeo vigoroso aunque presentan la desventaja del complejo mezclado del lecho, lo que impide la obtención de un secado uniforme.

Los secadores de lecho fluidificado pueden ser de dos etapas en serie y el tiempo de residencia de las partículas es más uniforme, pero la pérdida de carga resulta muy grande.

Las necesidades de combustible son del orden de 0.968 a 1.226 kWh/kg H<sub>2</sub>O eliminada y los requisitos totales para ventiladores etc. equivale aproximadamente a 0.066 kWh/kg H<sub>2</sub>O eliminada, la capacidad evaporativa es de 0.0003 a 0.0014 kg/m<sup>3</sup>s, la energía (poder térmico) de 2.5 a 7.5 megajoules/kg de H<sub>2</sub>O evaporada (Keey, 1972).

### Ventajas

- Control exacto de las condiciones, de tal manera que una cantidad predeterminada de humedad libre se pueda dejar en los sólidos, con el fin de evitar la formación de polvo del producto durante las operaciones del manejo de material
- Mano de obra baja debido a la simplicidad mecánica
- Bajo costo de mantenimiento

- Apto para material termosensible

### Desventajas

- Dificiles de manejar cuando el período de secado decreciente es muy largo
- Gran costo por consumo de ventiladores
- Es mucha la pérdida de carga en el distribuidor

Analizando finalmente los parámetros de operación, ventajas y desventajas de cada uno de los secadores estudiados, se llegó a la eliminación de los secadores que no eran adecuados para el proceso correspondiente; por lo tanto, el secador neumático es el que aparentemente presenta mejores condiciones para la operación de secado. El secador de banda y el de bandejas funcionan de forma similar, ya que la banda se comporta como una gran bandeja; sin embargo, los problemas que presenta el secador de banda lo dejan en desventaja frente al de bandejas, al menos para este tipo de proceso.

En la tabla 5.3 se muestran las variables más importantes que se compararán para tener la selección final del secador.

**Tabla 5.3 Variables específicas del secado en diferentes tipos de secadores**

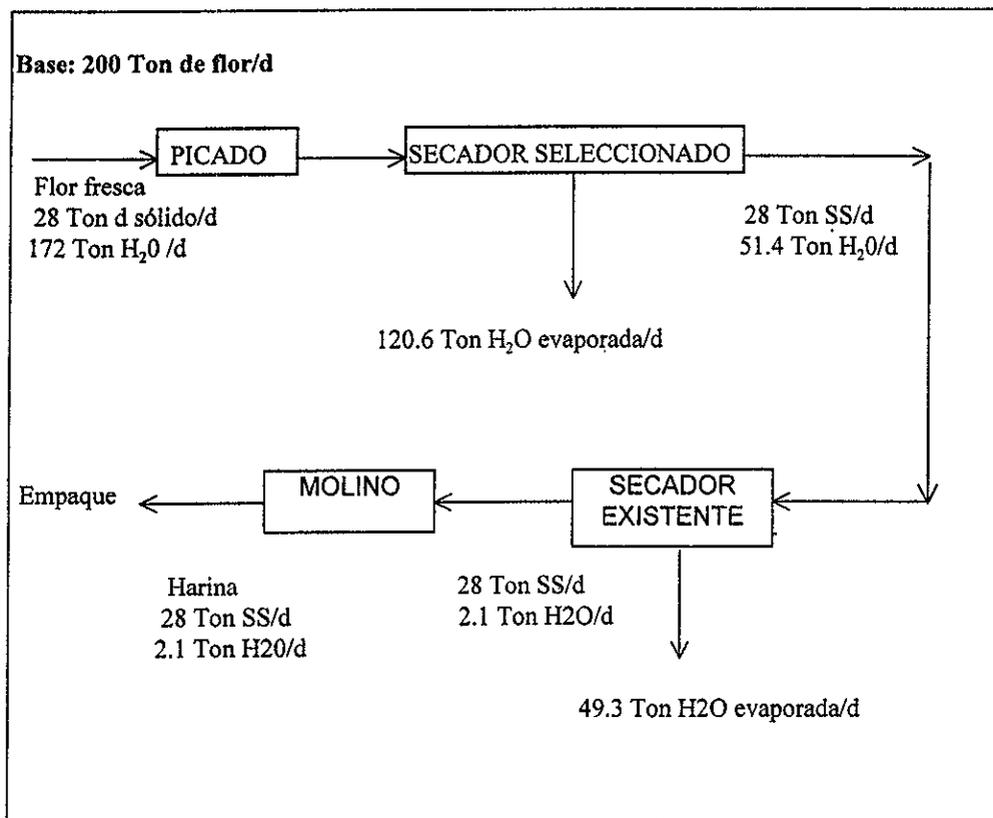
VARIABLE	SECADOR NEUMÁTICO	SECADOR ROTATORIO	SECADOR DE BANDAS
Tiempo de residencia dentro del secador	0.008 a 1 min.	0.08 a 1 h	3 a 12 h
Capacidad máxima de evaporación de agua	0.003 a 0.06 kg/m <sup>2</sup> s	0.0015 a 0.008 kg/m <sup>2</sup> s	0.001 a 0.0138 kg/m <sup>2</sup> s
Costo de mantenimiento	bajo	10% del costo de la planta	alto
Pureza del producto	Buena	Buena	Mínima perturbación del producto
Costo de operación	Bajo	Medio	Alto
Facilidad de limpieza	Muy fácil	Fácil	Fácil
Presenta problemas de esparcimientos de polvos	No	No	Si
Uniformidad en el tamaño de partículas	Buena	Regular	Regular
Costo de inversión	Bajo	Medio	Alto

Comparando los parámetros de la tabla 5.3 se llega a la conclusión de que el secador más factible es el de transporte neumático.

### 5.3 Diagrama de flujo del proyecto

Con base en este análisis, a continuación se presenta un diagrama de flujo del proceso más viable, técnicamente hablando, para secar un producto termosensible de forma irregular y con un alto contenido de humedad (Fig. 5.1), con los datos acordes a lo obtenido de los estudios de secado realizados en este trabajo. Este proceso substituiría al actual (Fig.2.1).

**Fig. 5.1** Diagrama de bloques y balances de masa para el proyecto de sustitución de las operaciones de ensilado y prensado por la de secado en una planta deshidratadora de cempasúchil en México



En la siguiente parte se evaluará un nuevo secador que substituiría las operaciones de ensilado y prensado de la flor. Por esta razón, aparecen en la Fig. 5.1 dos secadores, el nuevo propuesto y

el existente. Para plantas nuevas deberá reevaluarse el proyecto considerando solamente un secador que deshidrate la flor fresca hasta una humedad de 11%.

### 5.3.1 Cálculo del secador neumático

El cálculo del secador está basado en las especificaciones del producto terminado, en el contenido de agua de la materia prima, en datos obtenidos de la carta de humedad y en datos característicos de operación de estos secadores.

La base de calculo es sobre 200 T de flor fresca por día, procesadas en dos turnos de 8h (16h) para obtener un producto húmedo que entra al segundo secador y existente con 51.4 T de agua por día.

La tabla 5.4 muestra las bases de calculo del primer secador, después de realizar los balances de materia pertinentes.

**Tabla 5.4** Datos específicos del proceso

Producción $W_p$ (sólidos húmedos a la salida del secado)	4962.5 kg
Temperatura del aire del ambiente $T_0$	21.1 °C
Temperatura de los gases que entran al horno $T_1$	815.5 °C
Temperatura de salida de los gases $T_2$	148.9 °C
Temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada $T_{w1}$	18.3 °C
Temperatura de bulbo húmedo de los gases de salida $T_{w2}$	71.1 °C
Temperatura exterior del secador extremo caliente $T_3$	315.5 °C
Superficie de radiación $A$	93 m <sup>2</sup> (estimado)
Calor específico del agua $C_{pH_2O}$	4.18 kJ/kg °C
Calor específico del cempasúchil $C_{pflor}$	1.75 kJ/kg °C

En el diagrama siguiente se muestra la operación de secado así como los datos disponibles para el cálculo del secador.

$$S_1=200 \text{ Ton flor fresca/d}$$

$$Y_4=0.23 \text{ kgH}_2\text{O/kg aire seco}$$

$$X_1=172 \text{ Ton H}_2\text{O/d}$$

$$S_3=79.4 \text{ Ton SH/d}$$

$$W_1=28 \text{ Ton SS/d}$$

$$X_3=51.4 \text{ Ton H}_2\text{O/d}$$

$$Y_1=0.86 \text{ Ton H}_2\text{O/Ton SH}$$

$$W_3=28 \text{ Ton SS/d}$$

$$Y_2=0.0125 \text{ kgH}_2\text{O/kg aireSeco}$$

$$Y_3=0.6473551 \text{ Ton H}_2\text{O/Ton SH}$$

$$S_1 = 200 \frac{\text{Ton flor fresca}}{\text{dia}}$$

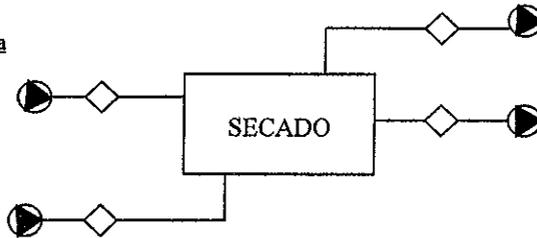
$$X_1 = 172 \frac{\text{Ton H}_2\text{O}}{\text{dia}}$$

$$W_1 = 28 \frac{\text{Ton SS}}{\text{dia}}$$

$$Y_1 = 0.86 \text{ Ton H}_2\text{O}$$

$$Y_2 = 0.0125 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg aire}}$$

$$G_2 =$$



$$G_4 =$$

$$Y_4 = 0.23 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg aire}}$$

$$S_3 = 79.4 \frac{\text{Ton SH}}{\text{dia}}$$

$$X_3 = 51.4 \frac{\text{Ton H}_2\text{O}}{\text{dia}}$$

$$W_3 = 28 \frac{\text{Ton SS}}{\text{dia}}$$

$$Y_3 = 0.64735 \text{ Ton H}_2\text{O}$$

### 1) Materia prima necesaria

Es la cantidad de materia que requiere entrar al secador por día para ser procesada

$$S_1 = 200,000 \frac{\text{kg de flor fresca}}{\text{día}}$$

### Flor fresca necesaria por hora.

Tomando en cuenta que se trabajan 16 horas al día tenemos

$$\frac{S_1}{16} = 200,000 \frac{\text{kg de flor fresca}}{\text{dia}} * \frac{1 \text{ dia}}{16\text{h}} = 12,500 \text{ kg de flor fresca/h}$$

### Agua en la entrada por hora

Es el agua que tiene la flor en la entrada del secador

$$\frac{S_1}{16} * Y_1$$

$$12,500 \frac{\text{kg SH}}{\text{h}} * 0.86 = 10750 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}}$$

### Agua a la salida por hora

Es el agua que tiene la flor una vez que sale del secador

$$\frac{S_3}{16} * Y_3$$

$$4962.5 \frac{\text{kg SH}}{\text{h}} * 0.6473551 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Sh}} = 3212.5 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}}$$

### 2) Agua por evaporar por hora

Es la cantidad de agua que tiene que eliminar el secador por las operaciones de ensilado y prensado:

Agua a la entrada del secador - Agua a la salida del secador

$$10,750 - 3212.5 = 7537.5 \text{ kg H}_2\text{O evaporada / h}$$

Sólidos secos a la entrada por hora

$$W_1 * \frac{1}{16}$$

$$28,000 \frac{\text{kg de SS}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{16\text{h}} = 1750 \frac{\text{kg de SS}}{\text{h}}$$

Sólidos secos a la salida por hora

Este tipo de secadores son muy eficientes y, como primera aproximación, no se consideran pérdidas; por lo tanto:

Sólidos secos que entran = Sólidos secos que salen

$$W_1 = W_3 = 1750 \frac{\text{kg de SS}}{\text{h}}$$

Sólidos húmedos a la salida del secador por hora es la suma de los sólidos secos más el agua que no se evaporó.

Sólidos húmedos a la salida = Sólidos secos + agua a la salida

$$S_3 = W_3 + X_3 \\ = 1750 \frac{\text{kg de SS}}{\text{h}} + 3212.5 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{h}} = 4962.5 \frac{\text{kg de Sh}}{\text{h}}$$

### 3) Cantidad de gases necesarios para secar

#### Balance global

$$S_1 + G_2 = S_3 + G_4$$

#### **Balance de agua**

La humedad que pierde el producto es igual a la humedad que ganan los gases

$$X_1 + G_2 Y_2 = X_3 + G_4 Y_4$$

Pero del balance de gases se tiene:  $G_2 = G_4$

por lo tanto 
$$X_1 + G_2 Y_2 = X_3 + G_2 Y_4$$

Despejando  $G_2$  
$$G_2 = \frac{X_1 - X_3}{Y_4 - Y_2}$$

Humedades (valores obtenidos de la carta de humedad)

Humedad de entrada del aire = 0.0125 kg de H<sub>2</sub>O/kg de aire seco

Humedad de salida de los gases = 0.23 kg de H<sub>2</sub>O/kg de aire seco

Humedad que ganan los gases

$$Y_4 - Y_2 = 0.23 - 0.0125 = 0.2175 \text{ kg de H}_2\text{O/kg de aire seco}$$

$$\text{Cantidad de gases} = 7,537.5 / 0.2175 = 34,655.17 \text{ kg de aire seco}$$

### 4) Cálculo del calor necesario

#### Balance de energía

Se considera tentativamente para el cálculo inicial que los gases tienen las mismas especificaciones y se comportan como el aire y después se corrige por las diferencias que haya en los calores específicos.

Para este objeto se considera la combustión de 100 moles de gas natural cuyas especificaciones y composición son, de acuerdo con PEMEX:

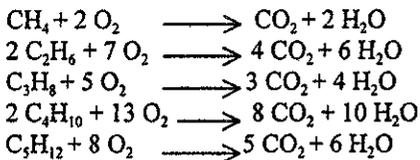
### GAS NATURAL

Peso específico, líquido	0.262
Peso específico, gaseoso	0.589
Poder calorífico	39,588.5 kJ/m <sup>3</sup>
Compuestos de azufre	0 ppm

### COMPOSICIÓN

Metano	94.52 %
Etano	4.28 %
Propano	0.89 %
Butano	0.17 %
Pentano	0.14 %

La combustión se hace en presencia de un exceso de aire y, por lo tanto, será completa de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



En la siguiente tabla se resume la cantidad de moles de O<sub>2</sub> necesarios para la reacción de 100 mole de gas natural, así como los moles generados de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O por concepto de esta reacción.

Base: 100 moles de gas natural

Compuesto	Moles	Moles O <sub>2</sub>	Moles CO <sub>2</sub>	Moles H <sub>2</sub> O
Metano	94.52	189.04	94.52	189.04
Etano	4.28	14.98	8.56	12.84
Propano	0.89	4.45	2.67	3.56
Butano	0.17	1.11	0.68	0.85
Pentano	0.14	1.12	0.70	0.84
TOTAL	100	210.70	107.13	207.13

El nitrógeno en los gases de combustión debido al oxígeno consumido para 100 moles de gas es:

$$210.70 \text{ mol O}_2 * \frac{79 \text{ mol N}_2}{21 \text{ mol O}_2} = 792.63 \frac{\text{mol}}{100 \text{ mol de gas}}$$

El aire necesario para la combustión será:

$$\frac{100 \text{ mol de aire}}{21 \text{ mol O}_2} * 210.70 \text{ mol O}_2 = 1003.3 \text{ mol de aire}$$

El agua formada en la combustión más el agua que contiene el aire utilizado para quemar el gas, le restan poder calorífico al combustible, de modo que se calculará el poder calorífico neto del mismo:

Agua por combustión

$$207.13 \text{ mol de H}_2\text{O} * \frac{18 \text{ kg de H}_2\text{O}}{\text{mol de H}_2\text{O}} = 3728.34 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{100 \text{ moles de gas}}$$

Agua por el aire

$$1003.3 \text{ mol de aire} * \frac{29 \text{ kg de aire}}{\text{mol de aire}} * \frac{0.0125 \text{ kg de H}_2\text{O}}{\text{kg de aire}} = 363.69 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{100 \text{ moles de gas}}$$

$$\frac{\text{Agua total}}{100 \text{ moles de gas}} = 3728.34 + 363.69 = 4092.03 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{100 \text{ moles de gas}}$$

El equivalente del total de agua en kilogramos por metro cúbico de gas se calcula para hacer la deducción de los kJ's:

$$\frac{1857.78 \text{ kg de H}_2\text{O}}{22.4 \frac{\text{m}^3}{\text{kgmol gas}}} * 100 \text{ moles de gas} = 0.829 \frac{\text{kg de agua}}{\text{m}^3 \text{ d gas natural}}$$

El poder calorífico neto del gas es

$$\text{P.C neto} = 39588.8 - 0.829 * r$$

$$r = \text{Calor latente a } 100 \text{ }^\circ\text{C} = 2180 \text{ kJ/kg}$$

$$PC \text{ neto} = 1062.7 - 0.1139 * 2180 = 37,781.58 \text{ kJ/m}^3$$

### Calor total necesario

El calor que se suministra al secador es exclusivamente el que llevan los gases como calor sensible. Dichos gases son una mezcla de aire y productos de combustión de composición que se desconoce por el momento y, por lo tanto, para hacer el cálculo del calor total que se le proporciona a estos gases, se toma el calor específico (Cp) del aire y después, si es necesario, se corrige el cálculo. El calor total es:

$$Qt = \text{Cantidad de gases} * Cs_{\text{aire}} (t_1 - t_0)$$

$$\begin{aligned} \text{Calor húmedo del aire} &= Cs_{\text{aire}} = Cp_{\text{aire}} + Cp_{\text{vapor}} (H) \\ &= 1.078 + 1.88 H_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Qt &= 34,655.17 (1.078 + 1.88 * 0.0125) (815.5 - 21.1) \\ &= 30,324,368.85 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

Cantidad requerida de combustible:

$$\frac{30,324,368.85 \text{ kJ/h}}{37781.58 \text{ kJ/m}^3} = 802.62 \text{ m}^3/\text{h} = 80.09 \text{ mol/h}$$

La cantidad de moles de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> que se producen por la combustión de 79.69 moles de gas natural sin considerar el agua son:

$$CO_2 = \frac{107.13 * 80.09}{100} = 85.80 \text{ mol/h} * 44 \text{ kg/mol} = 3,775.2 \text{ kg/h}$$

$$N_2 = \frac{792.63 * 80.09}{100} = 634.8 \text{ mol/h} * 28 \text{ kg/mol} = 17,774.8 \text{ kg/h}$$

$$\text{Masa total} = 3,775.2 + 17,774.8 = 21,550 \text{ kg/h}$$

Cantidad de aire:

$$34655.17 - 21,550 = 13,105.17 \text{ kg/h}$$

Composición de la mezcla, base seca:

$$CO_2 = \frac{3,775.2 * 100}{34,655.17} = 10.89\% \text{ en peso}$$

$$N_2 = \frac{17,774.8 * 100}{34,655.17} = 51.29\% \text{ en peso}$$

$$\text{Aire} = \frac{13,105.17 * 100}{34,655.17} = 37.81\% \text{ en peso}$$

Cálculo del Cp de los gases:

El Cp medio de los gases se calcula para ver si es necesario corregir por este concepto.  
Calores específicos medios para los tres gases entre 21.1 y 815.5 °C

$$C_p \text{ CO}_2 = 1.12 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ N}_2 = 1.11 \text{ "}$$

$$C_p \text{ aire} = 1.08 \text{ "}$$

$$C_p \text{ gases} = \frac{(1.12)(3,775.2) + (1.11)(17,774.8) + (1.08)(13,105.17)}{34,655.17} = 1.099 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

Debe considerarse que el calor total (Qt) no se utiliza íntegramente en llevar a cabo la operación del secado, sino que se distribuye como sigue:

Calor sensible para calentar la flor y su humedad

$$Q_1 = 12,500 (0.86 * C_{p_{\text{agua}}} + 0.14 * C_{p_{\text{flor}}}) (t_{w2} - t_0)$$

$$= 12,500 (0.86 * 4.18 + 0.14 * 1.75) (71.1 - 21.1) = 2,399,875 \text{ kJ/h}$$

Calor para evaporar agua a  $t_w = 71.1$  °C

$$Q_2 = 7,537.5 * r$$

Calor latente de evaporación =  $r = 2204$  kJ/kg

$$Q_2 = 7,537.5 * 2204 = 16,612,650 \text{ kJ/h}$$

Calor sensible que llevan los gases:

$$Q_3 = 34,655.17 * 1.099(148.9 - 21.1) + 7,537 * 4.18 (71.1 - 21.1) = 6,442,733 \text{ kJ/h}$$

Calor sensible en el producto:

$$Q_4 = \text{Cantidad de producto} * C_{p_{\text{flor}}} (t_w - t_0)$$

$$= 5,000 * 1.75 (71.1 - 21.1) = 437,500 \text{ kJ/h}$$

Pérdidas de calor por radiación y conducción

$$Q_n = A [ h_g (\Delta t) P_e * C [(t_1/100)^4 - (t_2/100)^4] ]$$

$$\text{Coeficiente de convección} = h_g = 0.7 + \Delta t_{atm}/375$$

$$\text{Poder relativo de radiación} = P_e = 0.20$$

$$\text{Coeficiente de radiación de un cuerpo negro} = C = 0.172$$

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2.3 \log \Delta t_1 / \Delta t_2} = \frac{(t_3 - t_0) - (t_2 - t_0)}{2.3 \log (t_3 - t_0 / t_2 - t_0)} \\ &= \frac{(315.5 - 21.1) - (148.8 - 21.1)}{2.3 \log (315.5 - 21.1) / (148.8 - 21.1)} = 199.8 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Por lo tanto  $h_g$  es:

$$h_g = 0.7 + 199.8 / 375 = 14 \text{ kJ/hm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 237.8 + 182.2 = 419.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 237.8 + 21.1 = 258.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

Por lo tanto  $Q_n$  es:

$$Q_n = 92.9 \{ 14(182.2 - 21.1) + 0.2 * 1.953[(419.9/100)^4 - (258.9/100)^4] \} = 210,297 \text{ kJ/h}$$

Calor total

$$Q_{t_1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_n$$

$$= 2,399,875 + 16,612,650 + 6,442,733 + 437,500 + 210,297 = 26,103,055 \text{ kJ/h}$$

$Q_t$  es mayor que  $Q_{t_1}$  debido a que el enfriamiento de los gases al principio se puede considerar prácticamente a humedad constante hasta la temperatura que se calcula despejando a  $t_1$  y sustituyendo  $Q_t$  por  $Q_{t_1}$

$$t_1 = 21.1 + [26,103,055 / (1.099 * 34,655.17)] = 706.47 \text{ }^\circ\text{C}$$

En la combustión del gas natural, como ya se mencionó, se genera agua, de tal forma que la humedad inicial real de los gases de secado es mayor a la que se tiene como dato, por lo cual, si se recalcula, se tiene:

$H'_1 = \text{kilogramos de aire} * H_1 + H_{20} \text{ combustión} + H_{20} \text{ de aire para combustión}$

$$= \frac{13,105.17 * 0.0125 + [(3728.34 * 80.09) / 100] + (363.69 * 80.09) / 100}{34,655.17}$$

$$= 0.0992 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg gas seco}}$$

La humedad final del aire también es mayor siendo:

$$H'^2 = \text{Agua total en el secador} - \text{agua que sale con el producto}$$

Agua total en el secador :

Agua inicial de la flor + Agua del aire en exceso + Agua generada en la combustión + Agua del aire para la combustión = Agua total en el secador

$$\text{Agua inicial de la flor} = 12,500 * 0.86 = 10,750 \text{ kg de } H_2O$$

$$\text{Agua del aire en exceso} = 13,105.17 * 0.0125 = 163.8 \text{ kg de } H_2O$$

$$\text{Agua generada en la combustión} = \frac{3728.34 \text{ kg de } H_2O}{100 \text{ mol de gas}} * 80.09 \text{ mol de gas} = 2,986 \text{ kg de } H_2O$$

$$\text{Agua del aire para la combustión} = \frac{363.69 \text{ kg de } H_2O}{100 \text{ mol de gas}} * 80.09 \text{ mol de gas} = 291.2 \text{ kg } H_2O$$

$$\text{Agua total que entra al secador} = 14,191 \text{ kg de } H_2O$$

$$\text{Agua que sale con el producto} = 12,500 * 0.257 = 3212.5 \text{ kg}$$

Entonces:

$$H'^2 = (14,191 - 3212.5) / 34,655.17 = 0.3167 \text{ kg de } H_2O/\text{kg de gas seco}$$

Los resultados obtenidos se tabulan a continuación

Alimentación mínima de flor fresca	12,500 kg/h
Capacidad de evaporación requerida	7,537.5 kg/h
Humedad de la flor a la entrada del secador	86 %
Humedad de la flor a la salida del secador	25.7 %
Temperatura de los gases a la entrada	815.5°C

Temperatura de los gases a la salida	121.1-148.8°C
Capacidad de producción	5,000 kg/h
Temperatura de entrada de la flor	21.1°C
Temperatura de salida máxima	71.1°C
Consumo de combustible	802.62 m <sup>3</sup> /h
Calor necesario por kg de H <sub>2</sub> O evaporada	4,023.13 kg/kg d H <sub>2</sub> O

#### 5.4 Elección de los modelos de los equipos

**SECADOR:** La selección del modelo y tamaño del equipo que se instalará es determinado por la capacidad evaporativa necesaria para satisfacer las condiciones propuestas en este proyecto. Es por esto que fue necesario buscar en catálogos y boletines en los cuales se encuentran modelos de secadores especiales para el tipo de materia prima que se está usando. Por ello se seleccionó el modelo SD105-32A, que tiene una capacidad de evaporación de 8,100 kg H<sub>2</sub>O/h y con un horno para quemar hasta 883.27 m<sup>3</sup>/h de gas natural con un gasto energético de 47 HP/h.

Para este proyecto se requiere instalar un secador con una capacidad para evaporar 8,100 kgH<sub>2</sub>O/h y de acuerdo al cálculo se van a evaporar 7,537.5 kg d H<sub>2</sub>O/h.

#### Equipo auxiliar

**PICADORAS:** Ya que la flor fresca llega a la planta deshidratadora sin picarse, se requiere una máquina picadora por cada secador. La capacidad de cada una de estas máquinas debe ser para picar:

$$\frac{12,500 \text{ kg/h}}{2} = 6,250 \text{ kg/h}$$

Las picadoras por ser más usadas en la agricultura se les encuentra en el mercado de México de muchas marcas y tamaños, pero todas son muy similares. En este caso se seleccionó una ensiladora como también se les conoce Marca Pepec Modelo 81, la capacidad de las dos picadoras es de aproximadamente de 9000 kg/h pica la flor a 6 mm (¼") la potencia necesaria para impulsar la picadora es de 20 HP.

#### Consumo de energía eléctrica

CONCEPTO	TIEMPO	HP
2 picadoras 20hp cada una	½ hora	20
1 secador 47hp	1 hora	47
Total		67

El consumo de energía eléctrica para producir 1 tonelada de harina de cempasúchil es equivalente a 67HP. Determinados en kW/h se calcula como sigue:

$$I = \frac{HP * 746}{1.73 * E * \%Ef * P.f}$$

Donde: E= 220 V    % Ef= 0.98  
 Pf= 0.85        HP= 67

Sustituyendo valores

$$I = 157.65 \text{ amperios}$$

$$kW = \frac{I * E * 1.73 * Pf}{1000}$$

$$kW = 51 \text{ kW/h}$$

### 5.5 Estimación de costos

Esta evaluación considera el costo del equipo, operación y mantenimiento, simultáneamente, cuantificará los ahorros obtenidos de no pagar por el vertimiento de aguas residuales no tratadas, generadas en las operaciones de ensilado y prensado.

La estimación de costos está basada considerando que la planta deshidratadora trabaja durante seis meses al año (180 días, 16 h/día).

**I.- Inversión fija.** Este rubro está considerado por los siguientes activos

#### 1. Activos fijos tangibles

##### a) Costo del equipo instalado

1 secador marca Heil Modelo SD105-3A, completo incluyendo motor eléctrico de 47 HP y controles	\$ 2,008,750
2 picadoras Rapec Modelo 81 completas con motor eléctrico de 20 HP y arrancadores	\$ 127,740
Valor total del equipo	\$ 2,136,490
b) Gastos de instalación.- Es el 25% del costo total del equipo, en este rubro se incluye el costo del equipo auxiliar	\$ 534,122.5

c) Fletes, seguros e impuestos.- Representa el 25% del costo del equipo \$ 534,122.5

2. Activos fijos intangibles

a) Planeación e integración del proyecto

b) Ingeniería del proyecto

c) Supervisión de la construcción

d) Administración del proyecto

e) Gastos de puesta en marcha

En el cálculo de este rubro se considera el 10% del total de la inversión fija \$ 391,690

3. Imprevistos

Para el cálculo se consideró el 15% del costo total de los equipos \$ 320,474

**Tabla 5.5.1 Monto total de la inversión**

CONCEPTO	INVERSIÓN
Activos fijos tangibles	3,204,735
Activos fijos intangibles	391,690
Imprevistos	320,474
<b>TOTAL</b>	<b>3,916,900</b>

**II.- Costos de operación.** En este renglón se analizaron solo los costos que generan un aumento al instalarse el secador.

a) Gas natural 2,299,968 m<sup>3</sup>/año  
a \$ 0.53 m<sup>3</sup> \$ 1,218,983

b) Energía eléctrica 146,880 kW/año a  
\$ 0.72 kW \$ 105,754

c) Mantenimiento 4% sobre IF por  
cada año \$ 156,676

d) Mano de obra directa. El número de empleados que se necesitara para operar los equipos serán 6 obreros calificados distribuidos en dos jornadas de 8 horas y el salario considerado a pagar a cada uno de ellos será de \$70.00/día (seguro social, prima vacacional, etc.)	\$ 75,600
e) Seguros e impuestos 1% de la IF por cada año	\$ 39,169
f) Depreciación y amortización es el 10% de la IF	\$ 391,690

**Tabla 5.5.2 Presupuesto del costo de operación**

CONCEPTO	INVERSIÓN
Gas natural	1,218,983
Energía eléctrica	105,754
Mantenimiento	156,679
Seguros e impuestos	39,169
Depreciación y amortización	391,690
Mano de obra	75,600
<b>TOTAL</b>	<b>1,987,875</b>

### **III. Ahorro por concepto de pago de derecho de vertimiento de aguas residuales de las operaciones de ensilado y prensado del proceso actual de las fábricas**

Para determinar el importe del derecho de descarga de aguas residuales, se deben considerar los siguientes aspectos:

- El importe del pago trimestral está en función de los volúmenes de aguas residuales descargados mensualmente así, como por la cantidad de contaminantes disueltos medidos como kg de DBO y de SST descargados por encima de la norma técnica ecológica y/o condiciones particulares de la descarga.

El Art. 277 que corresponde a la Ley Federal de Derechos en materia de agua (CNA 1996), considera contaminantes básico a las grasas y aceites, los sólidos suspendidos totales, la DBO, nitrógeno total, fósforo total y pH.

1. Se obtiene el volumen total (ensilado + prensado) de aguas residuales que se vierten por trimestre

Ensilado = 1962 m<sup>3</sup>/mes

Prensado = 1656 m<sup>3</sup>/mes

Volume total = 3618 m<sup>3</sup>/mes = 10,854 m<sup>3</sup>/trimestrales

2. Cálculo de la masa de concentraciones gravables de la descarga de agua residual

El cálculo de la masa gravable de contaminantes que tiene la descarga mensual de aguas residuales, se efectúa en dos fases sucesivas:

1a. fase: Se transforma de mg/L a kg/m<sup>3</sup> los valores de las concentraciones medidas que exceden a las permisibles (tabla 5.5.3), utilizando la siguiente identidad: 1mg/L = 0.001 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 5.5.3** Concentraciones medidas que exceden de las permisibles. Se estima las concentraciones en mg/L

CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN (mg/L)*	VALOR MÁXIMO PERMISIBLE **	EXCESO DE CONTAMINANTE
DBO	51,400	75	51,325
SST	10,025	75	9,950
P-total	1,550	20	1,530
N-total	780	40	740
Grasas y aceites	480	15	465
Intervalo de pH	4.4		

\*\*Diario oficial, segunda edición (1996)

\* Calidad representativa promedio del efluente crudo. Anónimo 1990

aplicación de tal equivalencia permite obtener las siguientes concentraciones de exceso de contaminante en kg/m<sup>3</sup>:

DBO : 51,325 \* 0.001 = 51.325

SST : 9,990 \* 0.001 = 9.950

P : 1,530 \* 0.001 = 1.530

N : 740 \* 0.001 = 0.740

Grasas y aceites : 465 \* 0.001 = 0.465

2a. fase: Se multiplican los valores de las concentraciones medidas de exceso de los permisibles en  $\text{kg}/\text{m}^3$  por el volumen total de agua residual descargado en el trimestre obteniendo la carga de contaminantes expresada en  $\text{kg}/\text{trimestre}$ .

DBO :  $51.235 * 10,854 = 557,081.55$   
 SST :  $9.950 * 10,854 = 107,997.30$   
 Pt :  $1.530 * 10,854 = 16,606.62$   
 Nt :  $0.740 * 10,854 = 8,031.96$   
 Grasas y aceites :  $0.465 * 10,854 = 5,047.11$

Para determinar el índice de incumplimiento y la cuota en  $\$/\text{kg}$  por cada contaminante se aplicó la siguiente fórmula:

Índice de incumplimiento =  $\frac{\text{Contaminante} - \text{Valor máximo permisible}}{\text{Valor máximo permisible}}$  obteniendo:

CONTAMINANTES	ÍNDICE DE INCUMPLIMIENTO
DBO	684.33
SST	132.66
Pt	76.5
Nt	18.5
Grasas y aceites	31

Con el índice de cada contaminante se procedió a seleccionar el intervalo que le corresponde en la Ley Federal de Derechos en materia de agua (CNA, 1996), encontrándose una cuota de  $\$2.50$  por  $\text{kg}$  de contaminante. Para obtener el monto a pagar por cada contaminante se multiplican los  $\text{kg}$  de contaminante trimestral por la cuota en pesos por  $\text{kg}$  de contaminante que corresponda a su índice de incumplimiento.

CONTAMINANTE	kg/TRIMESTRE	CUOTA $\$/\text{kg}$	MONTO DEL DERECHO $\$/\text{TRIMESTRAL}$
DBO	557,081.55	2.50	1,392,703.88
SST	107,997.30	2.50	269,993.26
Pt	16,606.62	2.50	41,516.55
Nt	8,031.96	2.50	20,079.90
Aceites y grasas	5,047.11	2.50	12,617.775

La cuota a pagar por concepto de pH se calcula según el intervalo en que se encuentre la descarga y los m<sup>3</sup> descargados trimestralmente (Fracción II, artículo 278C de la Ley Federal de Derechos en materia de agua, CNA, 1996).

INTERVALO DE pH *	DESCARGA (m <sup>3</sup> /trimestre)	CUOTA \$/m <sup>3</sup> *	MONTO DEL DERECHO \$/trimestre
4 - 5	10,854	0.025	271.35

\*Diario oficial, segunda edición (1996)

El monto del derecho de los contaminantes básicos debe ser multiplicado por un factor de acuerdo al tipo de cuerpo receptor, en el presente trabajo, corresponde al tipo B, siendo el factor 1.0 según el inciso C, fracción III, Art. 278C de la Ley Federal de Derechos en materia de agua (CNA, 1996).

Ya efectuado el cálculo trimestral del derecho por cada contaminante y tomando en cuenta el tipo de cuerpo receptor, la ley obliga a pagar únicamente el monto que resulte mayor, en este caso se pagará por la descarga de DBO.

#### IV. Estado de resultados económicos

En las tablas 5.5.4 a 6 se presentan los resultados económicos de la operación de secado del cempasúchil (Brindis y col; 1993)

**Tabla 5.5.4** Resultados económicos de operación del sistema de secado del cempasúchil (período anual)

CONCEPTO	1	2	3	4-10
Ingresos	2,785,408	2,785,408	2,785,408	2,785,408
Ahorro por descarga				
Egresos	1,987,875	1,987,875	1,987,875	1,987,875
Costo de operación				
Utilidad reinvertida al pago de IF	797,533	797,533	797,533	797,533

IF= Inversión Fija

**Tabla 5.5.5** Flujo neto de efectivo

CONCEPTO	0	1	2	3-10
Utilidad reinvertida	0	797,533	797,533	797,533
Depreciación	0	391,690	391,690	391,690
Inversión fija	3,916,900	0	0	0
FNE	-3,916,900	1,189,223	1,189,223	1,189,223

FNE= Flujo Neto Efectivo

## Criterios de evaluación económica

Antes de llevar a cabo una inversión es necesario determinar una tasa de referencia que será la base de comparación y cálculo de las evaluaciones económicas que se realicen. Si el proyecto no ofrece cuando menos esta tasa, la inversión se rechaza.

La determinación de la tasa de referencia también llamada tasa mínima atractiva de rendimiento (TMAR) está basada en la idea de que para obtener un crecimiento en términos reales del dinero que, se está invirtiendo, éste debe tener un rendimiento superior a la inflación, definiéndose la TMAR como:

$$\text{TMAR} = \text{tasa de inflación} + \text{premio al riesgo}$$

El término premio al riesgo es función del tipo de proyecto y representa el verdadero crecimiento del dinero.

El valor del premio al riesgo para el presente trabajo es del 11% por tratarse de una sustitución de tecnología en un proceso conocido con mercado definido (Baca-Urbina, 1990). La determinación de la tasa de inflación en el futuro está fuera del alcance de cualquier analista, por lo que se utiliza para los cálculos el valor que se tiene en el año de evaluación (12%) por lo tanto la TMAR para el proyecto es:

$$\begin{aligned}\text{TMAR} &= 12\% + 11\% \\ &= 23\%\end{aligned}$$

El cálculo de la tasa interna de rendimiento (TIR), como criterio de evaluación para la aceptación del proyecto, indica la tasa de descuento que hace que el valor presente sea igual a cero, es decir, es la tasa a la que se recupera la inversión sin ninguna ganancia adicional.

La TIR se compara contra la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) bajo los siguientes criterios:

Si  $TIR > TMAR$  se acepta el proyecto

Si  $TIR = TMAR$  se acepta el proyecto

Si  $TIR < TMAR$  se rechaza el proyecto

Para determinar la TIR se utilizó la siguiente ecuación donde se iguala la suma de los flujos netos de efectivo (FNE) de cada período a la inversión inicial (P)

$$P = \frac{\text{FNE}_1}{(1+i)^1} + \frac{\text{FNE}_2}{(1+i)^2} + \frac{\text{FNE}_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{\text{FNE}_{10}}{(1+i)^{10}}$$

Dejando a  $i$  como incógnita y resolviendo la ecuación se obtiene

$$TIR = 27.75\%$$

Comparando la TIR contra la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) puede observarse que  $TIR > TMAR$  por lo que el proyecto debe aceptarse.

El cálculo del valor presente neto (VPN) se usa como criterio de evaluación para la aceptación del proyecto. El VPN es el método con el que se trae del futuro al presente los FNE a su valor equivalente. La fórmula para calcularlo es:

$$VPN = -P + \frac{FNE1}{(1+i)^1} + \frac{FNE2}{(1+i)^2} + \frac{FNE3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FNE10}{(1+i)^{10}}$$

donde la tasa de descuento  $i$  que se utiliza es la TMAR 23% obteniéndose:

$$\begin{aligned} VPN &= -3916900 + 4518250 \\ &= 601350 \end{aligned}$$

El criterio en este caso es:

Si  $VPN > 0$  se acepta el proyecto

Si  $VPN < 0$  se rechaza el proyecto

Si  $VPN = 0$  se acepta el proyecto

### **Período de la recuperación de la inversión**

Es una medida de rentabilidad que se define como el tiempo necesario para recuperar de los beneficios y la depreciación la inversión inicial en instalaciones depreciables y se calcula a partir de los flujos netos de efectivo multiplicados por un factor de descuento que utiliza la tasa mínima aceptable de recuperación como tasa de interés para descontar todos los flujos de efectivo a su valor equivalente en el tiempo cero, obteniendo el flujo descontado o valor presente el cual se acumula año tras año como flujo de efectivo descontado acumulado. Cuando el flujo de efectivo descontado acumulado es positivo se considera que la inversión ha sido recuperada.

La ecuación para obtener el factor de descuento es:

$$FD = 1/(1+i)^n$$

donde  $i = TMAR$

· **Tabla 5.5.6** Período de recuperación de la inversión a valor presente

ANO	FLUJO NETO	FACTOR DE DESCUENTO	FLUJO DESCONTADO	FLUJO DE EFECTIVO DESCONTADO ACUMULADO
0	3,916,900	1	-3,916,900	-3,916,900
1	1,189,223	0.8130	966847.96	-2950052.1
2	1,189,223	0.6609	786055.25	-2163996.9
3	1,189,223	0.5374	639092.32	-1524904.6
4	1,189,223	0.4369	519583.62	-1005321.0
5	1,189,223	0.3552	422414.30	-582906.7
6	1,189,223	0.2887	343428015	-23947805
7	1,189,223	0.2347	279212.76	3973402
8	1,189,223	0.1908	227020.27	26675404
9	1,189,223	0.1551	184553.05	451307.5
10	1,189,223	0.1261	150042.64	601350.1

### Período de recuperación

El período de recuperación de la inversión se calculó con la siguiente fórmula:

$$PRIV = N-1 + \frac{(FAD)_{n-1}}{(FD)_n}$$

donde :

N= Año en que cambia de signo el flujo acumulado descontado

(FAD)<sub>n-1</sub>= Flujo de efectivo descontado de año previo a N

**Esto dió como resultado 6.85 años**

### 5.6 Condensado de resultados

Como resultado de este estudio se llegó finalmente a la decisión de que el secador neumático es la mejor opción para sustituir a las operaciones de ensilado y prensado de la flor por las siguientes razones:

- Tiempos de residencia muy bajos. El material pasa con gran rapidez a través del secador, lo cual es muy importante cuando se secan materiales orgánicos ya que son muy susceptibles de ser dañados si se exponen a un calor excesivo por mucho tiempo.
- Utiliza una temperatura de los gases mayores que cualquier otro equipo, debido a que la temperatura del producto no excede a la del bulbo húmedo por la rapidez con que se efectúa el secado.

- Como el producto no es de tamaño ni de humedad uniforme, las partículas más pequeñas se secan más rápido y son arrastradas por la corriente de aire fuera de la zona de altas temperaturas, mientras que las de mayor tamaño y humedad por su mismo peso son retenidas dentro del secado hasta que alcancen prácticamente el mismo grado de secado que las partículas más pequeñas.
- El secado por transporte neumático reduce al mínimo las pérdidas del producto, ya que solo se produce pérdidas del material más fino que escapa del circuito de instalación, pero aún estas pérdidas son muy bajas si se compara con las obtenidas por medio de la deshidratación mecánica. Estos finos pueden recuperarse en sistemas de recolección de polvos y retornarse a los sistemas de empaque.

Analizando la tabla 5.3, las variables son muy aceptables en los secadores preseleccionados, pero evaluando ventajas y desventajas, el secador neumático fue el óptimo para el secado del cempasúchil.

Con base en los diagramas de bloques y balances de masas de las Figs. 2.1 y 5.1 resultó que con el secado del cempasúchil se recuperan 8 toneladas por día de sólido seco elevado la eficiencia en el producto de harina final.

El equipo y accesorios que sustituyen a las operaciones de ensilado y prensado cuesta \$ 3,916,900 (pesos mexicanos al 30 de mayo de 1997). Los costos de operación son de \$1,987,875. Considerando como contraparte los pagos de derechos a la CNA por vertimiento de aguas residuales, se obtiene una tasa interna de retorno de 27.75%, con un periodo de recuperación de 6.85 años.

En el trabajo de Maciel (1997) se planteó la instalación de una planta de tratamiento de aguas para los efluentes líquidos generados en el proceso tradicional de secado del cempasúchil con una TIR de 26.81% y un periodo de 4.51 años. En esa evaluación económica no se consideró para el cálculo de la TMAR el factor de riesgo. Esto significa que la TIR y el tiempo de recuperación del capital invertido son menores de lo que realmente debieran ser. Por otro lado, dado que las sustancias disueltas presentes en las aguas residuales son de dos tipos, esto es, de tipo alifático y de tipo aromático, su capacidad de degradación es diferente. Estas últimas, de hecho, no pueden ser metabolizadas de manera sencilla por sistemas microbianos y las eficiencias depurativas no son mayores a 80% (Granados y López-Andrade, 1996).

Esto plantea que una tecnología más limpia es mejor que el uso de sistemas de tratamiento de aguas residuales ya que, de entrada, no se generan efluentes líquidos contaminantes, se conservan los pigmentos y, por ende, se tiene una mejor eficiencia de proceso.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De este trabajo pueden derivarse las siguientes conclusiones:

1. Es importante tomar medidas para combatir la contaminación que generan las industrias, buscando tecnologías más limpias, viables técnicamente y costeables. Para este proyecto, es conveniente el secado del cempasúchil fresco ya que es necesario contrarrestar el vertimiento de aguas residuales. Se determinó la selección de un secador neumático ya que presenta más ventajas que cualquier otro tipo de secador para secar productos orgánicos termosensibles como el cempasúchil. Se tomaron los criterios de aceptación y se determinó que el equipo funcione óptimamente para que el producto alcance todas las especificaciones de control de calidad.
2. En lo que respecta a la parte económica, si se seca el cempasúchil fresco la inversión se recuperaría en un tiempo de 6.85 años y la rentabilidad del proyecto sería del 27.75% (con respecto al secador seleccionado), considerando que éste está sustituyendo a las operaciones actuales de ensilado y prensado.
3. El ahorro que representa el pago de las cuotas que cobra la Comisión Nacional del Agua por los derechos de descarga de las aguas residuales son un rubro que debe tomarse en cuenta ya que son demasiado altas y es probable que las tarifas incrementen puesto que es un mecanismo para promover la reducción de la contaminación del entorno.

Se recomienda como siguiente paso experimental que se trabaje con un secador neumático a nivel piloto para encontrar las condiciones de operación óptimas y obtener resultados reales para así reevaluar la factibilidad económica del proceso y ofrecerlo a las empresas que lo requieran, incluso planteando el secado en un solo secador hasta la humedad final deseable.

## BIBLIOGRAFÍA

Anónimo. 1990. Efluente deshidratadoras. Reporte final. Pub. Laboratorios Bioquimex, S.A de C.V. México, D.F. México

Baca-Urbina, G. 1990. Evaluación de proyectos: Análisis y administración del riego. Editorial McGraw-Hill-Interamericana de México, S.A. de C.V. 2a. edición. México D.F. México.

Brindis, F. N., Orihuela, R. y Durán de Bazúa, C. 1993. Evaluación económica preliminar de la instalación de una planta anaerobia-aerobia para depurar aguas blancas de la industria papelera. Informe técnico de proyecto PAP-01-93. UNAM-Conacyt-BMFT-UNEP. México D.F. México.

Casarrubias, M. y Hernández, J. 1996. Tratamiento de aguas residuales derivadas del ensilado y prensado del cempasúchil (*Tagetes erecta*) en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA o UASB-reactor). Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Profesionales Zaragoza, UNAM. México D.F. México.

Cázares-Valenzuela, J. 1996. Comunicación personal.

CNA. 1996. Ley federal de derechos en materia de agua, Comisión Nacional del Agua. México D.F. México.

Coulsón-Richardson, S. 1983. Chemical engineering. Editorial Pergamon Press. Vols.2 y 6. Londres, Gran Bretaña.

Chávez-Sánchez, I; Ramírez-Burgos, L.I.; Pedroza-Islas, R. y Durán-de-Bazúa, C. 1995. Tratamiento aeróbico de aguas diluidas de cempasúchil en un reactor de biodiscos. Informe técnico de proyecto CEMPA-01-95. Pub. UNAM, PUMA-PIQA y QA México, D.F. México.

García-Hernández, F. 1993. Comunicación personal.

García-Price-Villarreal, R. Diseño de un secador tipo túnel. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, UNAM, México D.F. México.

Geankoplis, C.J. 1995. Transport Processes and Operations. Editorial Continental S.A de C.V. 2a. Edición. Mexico, D.F. México.

Granados, E. y López-Andrade, X. 1996. Separación e identificación de moléculas orgánicas en agua de proceso del campasúchil. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Profesionales Zaragoza, UNAM. México D.F. México.

INEGI. 1994. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F. México.

Keey, R. B. 1972. Drying principles and practice. Editorial Pergamon Press. Budapest, Hungría.

Maciel, M.A 1997. Tratamiento biológico de aguas residuales del procesamiento de campasúchil, estudio de factibilidad. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Nonhebel, G. 1979. El secado en la industria química. Editorial Reverté, S.A. México D.F. México.

Perry, J.H; Green, D.H. y Moloney, J.D. 1992. Manual del Ingeniero Químico. Editorial McGraw Hill-Interamericana. Tomos V, VI. México D.F. México.

Pistono-Raschieri, J. 1955. Deseccación de los productos vegetales. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España.

Prontuario de actualización fiscal. 1996. No. 173. Diciembre, México D.F. México.

Razous, P. 1955. Theorie, et pratique du sechage industriel. Editorial Dunod. París, Francia.

SARH. 1994. Dirección General de Información Agropecuaria, Forestal y de Fauna Silvestre. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.

## APÉNDICE A

### OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO

Las gráficas del contenido de humedad en función del tiempo de secado, se determinaron empleando las ecuaciones A1 y A2. La ecuación para determinar la humedad en base seca es:

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \dots\dots\dots A1$$

Donde : W = peso del sólido húmedo (kg)  
W<sub>s</sub> = peso del sólido seco (kg)  
X<sub>t</sub> = humedad en base seca (kg H<sub>2</sub>O/kgSS)

A continuación se determina el contenido de humedad de equilibrio X\* y se procede a calcular el valor del contenido de humedad con la siguiente ecuación.

$$X = X_t - X^* \dots\dots\dots A2$$

Para obtener la curva de velocidad de secado se calcula R para cada punto con la siguiente ecuación:

$$R = - \frac{W_s * \Delta X}{A * \Delta t} \dots\dots\dots A3$$

Donde : A = es el área de flor expuesta al secador 0.04 m<sup>2</sup>  
Delta X = la diferencia de humedades  
Delta t = la diferencia de tiempo (h)  
R = kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>h