

8
27



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Estudios Superiores
Cuautitlán

SECADO POR ASPERSION DE COLORANTES
NATURALES: BETALAINAS

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO EN ALIMENTOS

p r e s e n t a

Luis Manuel García Hernández



V N A M

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1990



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 está 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.

INDICE GENERAL

I	INTRODUCCION.....	2
II	GENERALIDADES DE LAS BETALAINAS	
II.1	EL BETABEL Y LAS BETALAINAS.....	4
II.2	LAS BETALAINAS.....	6
II.3	CINETICA.....	8
II.4	DEGRADACION DE LA BETANINA.....	12
II.5	ESTABILIDAD DE LAS BETALAINAS.....	15
II.6	EXTRACCION Y PURIFICACION.....	19
II.7	USOS.....	20
II.8	PRESENTACION EN EL MERCADO.....	21
III	GENERALIDADES DEL SECADO POR ASPERSION	
III.1	EL SECADO POR ASPERSION.....	22
III.2	VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	24
III.3	ETAPAS DEL SECADO.....	26
III.4	CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO.....	34
III.5	SECADO DE BETALAINAS.....	38
IV	METODOLOGIA	
IV.1	OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	39
IV.2	PROCESO DE EXTRACCION.....	40
IV.3	EXPERIMENTACION.....	41
IV.4	SECUENCIA DE CALCULO.....	43
IV.5	RESUMEN.....	44
V	ANALISIS DE RESULTADOS.....	46
VI	CONCLUSIONES.....	59
VII	NOMENCLATURA.....	63
VIII	BIBLIOGRAFIA.....	64

I) INTRODUCCION

La explosión demográfica ha traído como consecuencia el problema de alimentar a un mayor número de individuos, razón por la cual los alimentos se deben conservar para su consumo. En la antigüedad los métodos de conservación empleados eran la desecación, salazón, encurtido, fermentación y ahumado, con la limitante tener un bajo período de almacenamiento. Actualmente, aunque estas técnicas siguen usándose, una serie de métodos nuevos han sido creados gracias a los avances científicos. Entre estos destacan un género de sustancias químicas conocidas como aditivos alimentarios, en su mayoría carentes de valor nutritivo, que se han tornado indispensables. Las funciones que desempeñan dichas sustancias son más de 40, destacando las de conservación, texturizantes, aromatizantes, edulcorantes, acidulantes, antioxidantes y colorantes, estos últimos fundamentales en la selección de un producto en el mercado. Además de dar una apariencia agradable al consumidor y reforzar otras propiedades como el sabor, el color es un excelente indicador de calidad y madurez.

Los primeros colores empleados en la industria alimentaria fueron la cochinilla, el anato y caramelo, derivados de fuentes naturales. A partir de 1856, año en que Henry Perkins descubrió el primer colorante sintético, el panorama cambió, muchos otros colores fueron producidos y utilizados inicialmente en la industria textil. Estos colores proveían un rango más amplio de matices, eran más estables y uniformes que los colores naturales disponibles, razones por las cuales encontraron una amplia aceptación en la industria de alimentos.

Para 1900, aproximadamente 80 colores de la industria textil se utilizaban para colorear alimentos y bebidas, sin mucha consideración por la pureza del pigmento. Estas sustancias fueron empleadas para defraudar al consumidor, dando una buena apariencia a productos de mala calidad.

A principios de siglo, científicos de todo el mundo reconocieron que muchos de estos colores podían causar daños a la salud, por lo que fue necesario llevar a cabo estudios sobre la estructura química y toxicología de los colores existentes, concluyendo que solo algunos de éstos no eran perjudiciales. En nuestros días se echó un segundo vistazo a estos colorantes, y bajo estrictos criterios varios de ellos fueron prohibidos o limitados en su uso. Por ejemplo, en los Estados Unidos sólo 9 colores sintéticos están permitidos: 2 amarillos, 4 rojos, 2 azules y un verde, colores seleccionados entre cientos.

La prohibición de los colores sintéticos dió lugar al aumento en los estudios sobre extracción y aplicación de pigmentos naturales, haciendo mas factible su uso en alimentos. Entre los colores naturales que en la actualidad tienen valor comercial figuran las antocianinas, carotenos y betalainas. Estas últimas se encuentran en el betabel, y su uso en alimentos está permitido desde 1960. Por su alto contenido de color y su elevado poder de tinción, el betabel se ha convertido en una de las alternativas para obtener un color natural en gran escala.

El presente trabajo es un estudio que pretende establecer las condiciones de secado más adecuadas para colores purificados de betabel, empleando para ello un secador por aspersión.

II GENERALIDADES DE LAS BETALAINAS

II.1) EL BETABEL Y LAS BETALAINAS

El término betalaínas se refiere a los colores rojos y amarillos solubles en agua que se encuentran en plantas pertenecientes al orden centrospermae y de las familias Chenopodiaceae, Didieraceae, Amaranthaceae, Nyctaginaceae, Stegnospermaceae, Arizoaceae, Ficoidaceae, Rascallaceae y Cactaceae. El betabel (*Beta Vulgaris* L.) perteneciente a la familia Chenopodiaceae, puede considerarse como materia prima agrícola para la obtención de colores rojos y amarillos.

El betabel es una planta bianual que prácticamente se cultiva todo el año. En nuestro país las principales zonas productoras se encuentran en los estados de Sonora, Tamaulipas, Michoacán, Guanajuato, Aguascalientes, Baja California Sur, Veracruz y Yucatán. En estas se cultivan las variedades Asgrow, Wonder, Red Pack, Crosby, Black Beauty, Detroit, King Red, Royal Red y Special Crosby. Dependiendo de la variedad, el betabel tarda de 57 a 90 días para madurar a partir de la siembra. Bajo condiciones óptimas de cultivo se pueden obtener hasta 45 toneladas por hectárea (22).

La concentración de color en el betabel está determinada por la variedad, la fertilidad de la tierra, humedad del suelo, irrigación y los días transcurridos hasta la cosecha (22). Un contenido bajo de color puede ser resultado de una temperatura ambiente alta durante el crecimiento. Betabeles con diámetros de 4.6 a 6.4 cm tienen mayor concentración de color que aquellos con diámetro superior a 6.4 cm, factor importante a considerar en la

selección de la materia prima. La efectividad de la extracción de los pigmentos depende de la facilidad de conseguir variedades con alto contenido de color durante todo el año, de las prácticas de cultivo, del uso de cámaras frigoríficas, del método de extracción y purificación así como de los equipos de evaporación y secado.

El betabel puede ser almacenada por varios meses en cámaras frigoríficas. El tiempo de almacenamiento no influye en la recuperación de colores en los primeros 5 meses. Los extractos tienden a ser más rojos al principio, mientras que a los 5 meses son más anaranjados (22). La composición media de los betabeles cultivados en México se muestra en la tabla I.

 TABLA I. COMPOSICION MEDIA DEL BETABEL

ELEMENTO	%
PROTEINAS	1.6
GRASA	0.1
CENIZAS	1.1
CARBOHIDRATOS	9.6
AGUA	85 - 90
FIBRA CRUDA.....	0.9
COLOR	0.2 - 1

(14)

II.2) LAS BETALAINAS

Las betalainas son aminocidos de amonio cuaternario, divididas en dos categorias: las betacianinas (rojos) y las betaxantinas (amarillos). El betabel es el vegetal mas común que contiene betalainas, pero hay otras fuentes potenciales (25). La betacianina presente en mayor cantidad es la betanina, abarca aproximadamente del 75 al 95 % del total de los colores rojos, el resto esta constituida por isobetanina, betanidina e isobetanidina. Las betaxantinas están constituidas por la vulgaxantina I y II, siendo la primera la más abundante.

La betanina es el glucósido de la betanidina y la isobetanina un epímero de la betanina en el carbono 15 (fig.1). La betanina contiene en su estructura tres grupos carboxílicos, dos con un pKa de 3.4 y otro con pKa de 2, un grupo fenólico con pKa de 8.5 y dos carbonos asimétricos en las posiciones 2 y 15. Los tres ácidos carboxílicos, el amonio cuaternario y la glucosa son los responsables de la solubilidad.

Bajo condiciones ácidas o alcalinas la betanina y la betanidina se transforman en sus epímeros isobetanina e isobetanidina en ausencia de oxígeno. Las betalainas se encuentran en forma de zwitteriones (forma electrostáticamente neutra de un aminocido o ión dipolar), y se caracterizan porque en medios ligeramente ácidos migran hacia el ánodo.

Las betalainas son muy solubles en agua, ligeramente solubles en alcoholes como metanol y etanol e insolubles en solventes orgánicos acetona, cloroformo y benceno.

La determinación de la concentración de las betalainas se

hace por espectrofotometría. La máxima absorbancia en el espectro se obtiene a 537 nanómetros (nm) para betanina y 478 nm para la vulgaxantina I a pH 5. La purificación del color involucra electroforesis o columnas de intercambio iónico. Las betalainas no cambian de color en un rango de pH de 3 a 7, dándose la máxima estabilidad a pH 5 (29-43). Su poder de tinción, basado en la absorbancia, es igual o mayor a la de los colores sintéticos. Por ejemplo, los rojos 2, 3 y 40 tienen absorbancias de 460, 1145 y 580 nm, mientras que el de la betanina es de 1120 nm (29). Esta característica ha colocado a las betalainas en un lugar aceptable dentro de los colorantes naturales que pueden sustituir a los sintéticos.

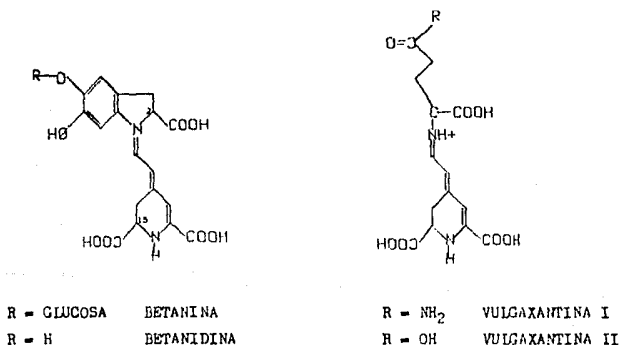


FIG 1. ESTRUCTURAS QUÍMICAS DE LOS COLORES DEL BETAREL. (41)

II.3) CINÉTICA

La amplia aplicación de los betalaínas en alimentos se ha visto limitada por la sensibilidad que presentan a los tratamientos involucrados en la preparación, procesamiento y almacenamiento tanto de los pigmentos puros como de los productos coloreados. Para entender la forma en que se pierde el color, la velocidad con que ocurre dicha pérdida y las ecuaciones matemáticas que las relacionan, es necesario hablar de cinética. La teoría cinética sirve como base para predecir la rapidez con la que el color se perderá cuando se encuentre sometido a condiciones desfavorables de temperatura, luz, oxígeno, pH y actividad de agua, además de proporcionar las bases teóricas y consideraciones a tomar en cada una de las operaciones relacionadas con la obtención, almacenamiento y uso de los pigmentos.

La cinética es el estudio de la velocidad de las reacciones, entendiéndose por velocidad de reacción la cantidad de materia (color) que esta siendo consumida (o producida) por unidad de tiempo (47).

Cualquier reacción que ocurra en la naturaleza depende de la temperatura, presión y concentración de reactivos bajo las cuales se lleve a cabo. La velocidad de las reacciones está descrita por la constante de velocidad (k) y la ecuación (50):

$$-dC / dt = k C^s \dots\dots\dots(1)$$

donde C representa la concentración del componente en estudio a cualquier tiempo t y s el orden de reacción, que describe la

manera en que la velocidad depende de la concentración de reactivos. Muchas de las reacciones de descomposición de componentes alimenticios sigue una cinética de primer orden, para este caso particular $s=1$, convirtiendo a la ecuación 1 en:

$$-dC / dt = k C \quad \dots\dots\dots(2)$$

La aplicación de esta ecuación se hace en su forma integrada, tomando como límites de integración para $t=0$: $C=C_0$ y para $t=t$: $C=C$ obteniéndose:

$$\ln [C / C_0] = - k t \quad \dots\dots\dots(3)$$

donde C_0 y C son las concentraciones inicial y final del componente en estudio, y t el tiempo de reacción. Esta ecuación indica que la concentración decrece exponencialmente con el tiempo. Una gráfica en papel semilogarítmico (concentración vs. tiempo) da una línea recta de cuya pendiente se puede obtener la constante de reacción ($m=k/2.303$).

Un parámetro comúnmente utilizado en la cinética de reacción es el tiempo de vida media ($t(1/2)$), definido como el tiempo necesario para producir (o consumir) 50% de la cantidad inicial de reactivo, esto es, para $t= t(1/2)$ entonces $C= 0.5 C_0$. Sustituyendo en la ecuación 3 y resolviendo:

$$t(1/2) = \ln 2 / k = 0.693 / k \quad \dots\dots\dots(4)$$

Para cualquier reacción química, la temperatura es siempre uno de los primeros factores que se deben considerar. Es de todos visto que calentando el recipiente que contiene los reactivos agiliza la reacción, mientras que el frío tiene el efecto contra-

rio. Para relacionar la temperatura con la velocidad de reacción Arrhenius propuso en 1899 la ecuación (47):

$$k = k_0 \exp \left[-E_a / RT \right] \dots\dots\dots(5)$$

donde k_0 es una constante de integración y se conoce como factor preexponencial, E_a es la energía de activación, R la constante general de los gases y T la temperatura. Graficando k vs. $1/T$ en papel semilogarítmico se obtiene una recta de cuya pendiente ($m = -E_a/2.303 R$) se obtiene la energía de activación.

La química orgánica se utiliza como herramienta para el estudio de la estructura del sistema conforme se desarrolla la reacción (59). Cada configuración de las moléculas y sus átomos durante el procedimiento de cambio de reactivos a productos tiene una energía asociada con ella. Puesto que la reacción implica por lo general acercar los reactivos y generar la ruptura de enlaces, estas estructuras tienen energías mayores que los reactivos aislados. En otras palabras, conforme los reactivos se acercan entre sí y comienzan a sufrir cambios moleculares que los convertirán a productos, incrementa la energía de sistema. Al avanzar la reacción, la energía sigue en aumento hasta alcanzar una estructura de energía máxima y, a partir de este punto, se siguen dando los cambios que culminarán en los productos finales, pero las estructuras representan una energía cada vez menor hasta que los productos quedan totalmente establecidos (59).

La diferencia de energía de los reactivos aislados y la estructura de energía máxima por la que atraviesa el sistema en su trayectoria para llegar a los productos se conoce como energía de activación. Esta energía máxima corresponde a una estructura

definida denominada estado de transición, y la medida del desarrollo de la reacción de reactivos a productos constituye la coordenada de reacción (fig 2). (59)

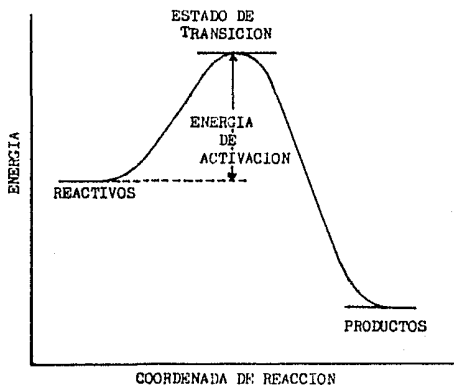


FIG.2. REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL CONCEPTO DE ENERGIA DE ACTIVACION

II.4) DEGRADACION DE LA BETANINA

Dentro de los principales factores de degradación de los betalainas se encuentran la temperatura, oxígeno, pH, luz y actividad de agua.

La betanina, al encontrarse en solución y someterse a condiciones ambientales desfavorables, se hidroliza dando lugar al ácido betalámico (AB) y la cistolopa 5-O glucósido (CIG) (fig.3). Esta reacción es parcialmente reversible, involucra una base de Schiff con reacción de condensación del grupo amino de la CIG y el aldehído del AB. Esta reacción es dependiente del pH y la temperatura (16).

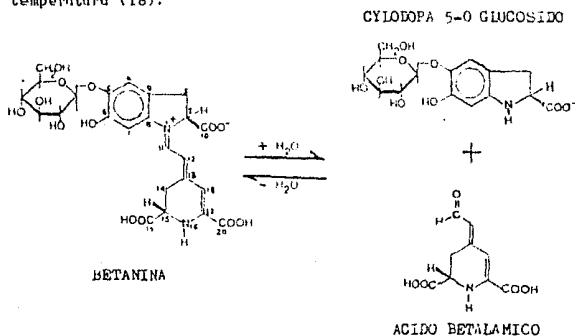


FIG (3). HIDROLISIS DE LA BETANINA (16)

Si el tratamiento se efectúa por tiempos prolongados, el color se degrada completamente dando lugar a la aparición de compuestos oscuros (fig. 4). En estos casos el AB sigue la reacción de oscurecimiento de Maillard, cuyos pigmentos oscuros se conocen como melanoidinas, y la CIG se polimeriza dando lugar a

melaninas, características del oscurecimiento enzimático (57). Estas reacciones son más rápidas bajo condiciones alcalinas y la velocidad decrece con la remoción de oxígeno y un incremento en la acidez.

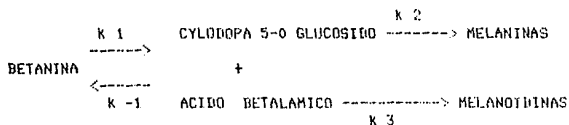


FIG (4). DEGRADACION TOTAL DE LA BETANINA (42)

Los valores de energía de activación así como las constantes de reacción se reportan en la tabla II.

El valor de la constante k_1 es mayor a valores extremos de pH, indicando que la hidrólisis se acelera por la concentración de iones H^+ y OH^- . La constante k_{-1} se incrementa con la reducción de pH. La energía de activación para la reacción de condensación entre la CDG y el AB (k_{-1}) para formar betanina es muy pequeña, variando de 3.5 a 0.6 Kcal/mol a pH 3 y 5 respectivamente, indicando que la reacción k_{-1} se favorece y explica por que hay regeneración después de un tratamiento térmico (17).

La degradación de la betanina en solución esta determinada por las constantes k_1 y k_{-1} , teniéndose la máxima estabilidad cuando k_1 es pequeña y k_{-1} grande, situación que se presenta con valores de pH entre 4 y 5.

El valor de k_3 para el AB en presencia y ausencia de oxígeno fue menor a pH 7, indicando la máxima estabilidad, siendo aproximadamente 10 veces mayor comparada con la obtenida a pH 3. La CDG es muy inestable en presencia de luz y oxígeno, por lo que

se recomienda manejar una atmósfera de nitrógeno y reducir el pH.

TABLA II, VALORES DE LA ENERGIA DE ACTIVACION Y DE LAS CONSTANTES DE REACCION PARA BETANINA EN PRESENCIA DE OXIGENO A 65 C.

ctes	pH				
	3	4	5	6	7
k 1	0.024	0.014	0.010	0.013	0.026
En 1	21.400	17.200	17.600	17.800	19.100
k-1	3.400	2.200	0.810	0.330	0.180
En-1	3.500	1.000	0.600	0.800	2.100
k 2	0.032	0.018	0.010	0.006	0.004
En 2	15.800	14.300	13.000	15.000	15.900
k 3	0.024	0.026	0.028	0.032	0.034
En 3	14.700	11.200	9.200	8.700	8.400

Ea [=] Kcal/mol, k [=] min⁻¹ (16,41)

La cantidad de betanina que se regenera después de un tratamiento depende de la cantidad del AB y la CDG disponibles para la reacción de condensación. Dado que la regeneración depende del pH, las condiciones ideales serán a un valor en el cual la diferencia entre k 2 y k 3 sea menor y la acumulación de AB y CDG la mayor, ocurriendo esto a pH 6. La menor regeneración a valores bajos de pH se debe a que el grupo amino de la CDG se encuentra protonado, reduciendo su capacidad de reacción (16).

Referente a la vulgaxantina I, la máxima estabilidad se obtiene a pH 5, siendo mayor en el jugo natural del betabel que en las soluciones de colorante purificado. La energía de activación calculada es de 25.2 Kcal/mol. Comparado con la betanina, la vulgaxantina I es aproximadamente 10 veces más sensible a la temperatura. El tiempo de vida media a pH 5 y 55 C fué de 1100 minutos para betanina, mientras que para la vulgaxantina I de sólo 100 minutos (39).

II.5 ESTABILIDAD DE LAS BETALAINAS

II.5.1) TEMPERATURA

Aunque son varios los factores que afectan de manera significativa la estabilidad de las betalainas, la temperatura ocupa un lugar preferente por la relación que guarda con el secado. Se mencionó en el capítulo anterior que al degradarse la betanina no solo se pierde el color, sino también aparecen colores oscuros (42). La temperatura acelera la velocidad de descomposición del color sea cual sea el medio en el que se encuentre, haciendo que la sensibilidad del producto se vuelva el punto crítico de la operación y el factor a estudiar.

Si tomamos en cuenta lo anterior, se deberá seleccionar la menor temperatura de secado posible para disminuir el riesgo de pérdida de color. Desafortunadamente, en el secado el máximo rendimiento de producto por unidad de tiempo, mayor eficiencia y economía se obtienen cuando la temperatura de secado y la concentración de sólidos en la solución son lo más altas posibles. Por estas razones las condiciones de secado deben determinarse experimentalmente, considerando tanto las características del producto obtenido como las de operación del equipo.

Como se mencionó en el punto II.4, la estabilidad de la betanina es aproximadamente 10 veces mayor que la vulgaxantina 1. Por esta razón y el valor comercial del color rojo, estos serán utilizados como referencia para evaluar el proceso, considerando que una pérdida de rojos implicará una mayor de amarillos.

La influencia de la temperatura en la conservación del color se muestra en las tablas III y IV.

 TABLA III. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y pH EN EL TIEMPO DE VIDA
 MEDIA DE BETANINA

TEMP.	pH				Ea
	4.8	5.2	5.8	6.2	
61.5	110.1	124.0	154.3	126.6	18.8
75.5	28.5	41.9	47.4	41.2	18.8
85.5	17.1	18.5	21.7	17.1	19.6
100	6.1	7.1	7.3	5.9	19.7

 TABLA IV. EFECTO DE LA TEMPERATURA Y pH EN EL TIEMPO DE VIDA
 MEDIA DE BETANINA

TEMPERATURA	pH	TIEMPO DE VIDA MEDIA
25	5	1150 +- 100
	7	110 +- 10
50	5	310 +- 30
	7	50 +- 5
75	5	90 +- 10
	7	20 +- 2

 T[=] C, t(1/2) [=] min, Ea [=] Kcal/mol (36, 43)

La temperatura da lugar a una cinética de primer orden, con una energía de activación de 19.22 Kcal/mol. La máxima estabilidad se tiene a pH 5.8 (36). De la tabla III se observa que un incremento de 38.5 C reduce el tiempo de vida media de 124.0 a 7.1 min (un 95%) a pH 5.2, mientras que de la tabla IV con un incremento de 50 C el tiempo de vida media pasa de 1150 a 90 minutos (un 92%) a pH 5, de ahí la importancia de controlar la temperatura durante el proceso.

II.5.2) OTROS FACTORES DE DEGRADACION

Es necesario tener en mente que en la obtención de colores purificados de betabel estos van a estar sometidos a diferentes condiciones en cada una de las etapas del proceso. En ellos la pérdida de color esta asociada en la mayoría de los casos a la combinación de los siguientes factores:

- pH
- oxígeno
- luz
- actividad de agua

Por lo que respecta al pH, se sabe que valores extremos aceleran el proceso de hidrólisis; sin embargo las betalaínas son estables en un rango de 3 a 7 (41), siendo máxima a pH 5.8, valor muy cercano al pH del betabel (pH 5.5). En este intervalo no hay cambios en la lectura del espectrofotómetro, pero fuera de ellos hay modificaciones en la estructura de la molécula y en la absorbancia. La energía de activación no se modifica en el rango de pH de 4.8 a 6.2 (36), por lo que el efecto de esta variable recae sobre las constantes de reacción y los tiempos de vida media como se muestra en las tablas II, III y IV.

La velocidad con la que se se pierde el color se incrementa con la presencia de oxígeno y luz, pero decrece con la actividad de agua (AW) (31). La luz da lugar a una cinética de primer orden, con una energía de activación de 19.2 Kcal/mol y tiempos de vida media de 3.2 horas a 55 C (2).

La betanina reacciona con oxígeno molecular y es una de las

principales causas de pérdida durante el procesamiento y empleo del color en alimentos. El efecto de varios antioxidantes como el ácido ascórbico, isoascórbico y EDTA (ácido etilen diamino tricloroacético) han sido estudiados (3). En presencia de oxígeno la cinética de degradación es de primer orden, con energía de activación de 20.4 Kcal/mol y tiempos de vida media a pH 5 y 90 C de 22.6 minutos, situación en la que se tiene una menor regeneración del color. En ausencia de oxígeno se presentan desviaciones respecto a la cinética de primer orden, pero la estabilidad se incrementa de 4 a 5 veces (42). En estudios a temperatura constante de 15 C, la luz causa una pérdida de color de 15.6% y el oxígeno de 14.6%. Si se expone una solución de betalaínas a luz y oxígeno simultáneamente, la degradación global es de 28.6%, indicando que el efecto es acumulativo (2).

Por último, la actividad de agua (A_w) da una variación exponencial en la constante de reacción, reflejándose en el tiempo de vida media. A $A_w=0.37$ el tiempo de vida media es de 124 minutos, mientras que a $A_w=1$ el valor es de 33 minutos (4 veces menor).

II.6) EXTRACCION Y PURIFICACION

Existen diversos métodos para llevar a cabo la extracción de los colores del betabel (14,22,36,44), obteniéndose en la mayoría de los casos concentrados no purificados con concentraciones de color que varían entre 0.5 y 1%, el resto de los componentes son proteínas (10%), carbohidratos (80%) y sales (8%), conservándose el olor y sabor característicos del betabel.

La extracción de las betalainas se basa en su solubilidad en agua. Las temperaturas recomendadas varían desde los 15 a los 100 C dependiendo principalmente del objetivo de la operación, esto es, si se requiere inactivar enzimas, pasteurizar o simplemente extraer el calor. Revisando los diferentes métodos de extracción se se pueden encontrar varias operaciones comunes, entre ellas están la molienda en presencia del solvente, la filtración para eliminar el bagazo, la evaporación para la concentración de la solución y finalmente la obtención de polvos por liofilización o secado por aspersión.

Los métodos de purificación del color se basan en que en medios ligeramente ácidos las betalainas migran hacia el ánodo o bien interaccionan con una resina aniónica. Las técnicas de purificación son:

- 1) cromatografía en columna
- 2) electroforesis
- 3) cromatografía líquida de alta presión
- 4) ultrafiltración u ósmosis inversa

todas ellas con el inconveniente de utilizarse para la obtención

de cantidades moderadas, ya que su alto costo no permite el escalamiento a nivel piloto o industrial. En el caso de la ultrafiltración y ósmosis inversa el costo de las membranas limita su uso, además de que no sería posible separar por esta vía el color de los azúcares, componente mayoritario de los extractos de betabel.

II.7) USOS DE LA BETALAINAS

Existen varios trabajos (14-29-30-41) en los que se ha llegado a la conclusión de que las betalaínas pueden sustituir a los colores sintéticos en productos como:

- a) Alimentos secos como sopas y aderezos para ensalada.
- b) Productos enlatados como jitomate, salsa para pizzas, cerezas y fresas.
- c) Productos en escabeche como rábanos.
- d) Productos cárnicos como salchichas y hamburguesas, sustituyendo los nitritos y nitros.
- e) Productos lácteos como yogurt, cremas para sandwich y rellenos de fruta.
- f) Pastres y dulces como jaleas y mermeladas.
- g) Gelatinas y polvos para refrescos instantáneos.
- h) Productos congelados (paletas, helados).

Los alimentos en los que se pueden utilizar las betalaínas presentan las siguientes características:

- 1) Actividades de agua la más bajas posibles.
- 2) pH de 5 o lo más cercano a éste.
- 3) Alimentos que no sufran tratamientos térmicos prolongados o que la adición del color pueda ser posterior al calentamiento.
- 4) Alimentos en envases que aislen al producto de la luz y el oxígeno cuando el tiempo de almacenamiento es prolongado.
- 5) Alimentos con una corta vida de anaquel.

Las concentraciones empleadas varían del 0.1 al 2%.

II.8) PRESENTACION EN EL MERCADO

En general son 3 las formas de comercializar el color:

- 1) Polvos de betabel completo, secado y molido. Estos no son completamente solubles por tener pulpa entera. Esta es la presentación más económica.
- 2) Concentrados de colorante en forma de un líquido viscoso con concentraciones entre 40 y 60%, obtenidos por evaporación al vacío de los extractos acuosos.
- 3) Polvos obtenidas mediante el secado por aspersión.

Las dos últimas presentaciones pueden involucrar un proceso de purificación, lo que incrementa el costo de obtención.

III GENERALIDADES DEL SECADO POR ASPERSION

III.1) EL SECADO POR ASPERSION

La aplicación original del secado por aspersión, a fines del siglo pasado, fué la de convertir un producto altamente perecedero (leche) en una forma seca estable que pudiera ser almacenada y vendida posteriormente. No fue sino hasta los años 30 en que otros dos productos pudieron añadirse a la lista: huevo y café soluble. Con la segunda guerra mundial se hizo necesario producir alimentos secos baratos, de alto valor nutritivo y estables. Desafortunadamente, la gran demanda y el nacimiento de una tecnología resultó en un bajo control de calidad y productos de apariencia poco atractiva al consumidor. Una vez finalizada la segunda guerra muchos productos, tanto de la industria química como de alimentos, pudieron secarse por aspersión. El incremento en el interés por obtener polvos de buena calidad colocó a las industriales en una posición más favorable para secar materiales nuevos y mejorar la calidad de los ya existentes (19).

El secado se define como el proceso mediante el cual el calor es aplicado para remover la mayor parte del líquido de una solución que contiene sólidos. El secado por aspersión se basa en la reducción de una solución a un rocío mediante un atomizador dentro de una cámara, el mezclado de este rocío con una corriente de aire caliente que proporciona el calor necesario para la evaporación del agua y como vehículo para eliminar la humedad. Finalmente el producto seco se separa de la corriente de aire por medio de filtros o ciclones. La figura 5 muestra el diagrama de la instalación de secado con lo que se cuenta. El tiempo total

de secado varía entre los 5 y 30 segundos dependiendo el tamaño de la instalación (6). Por estos tiempos tan bajos el secado por aspersión es considerado un proceso instantáneo en el que las pequeñas gotas formadas por el atomizador permiten el secado en una sola etapa, acompañado por un importante efecto de enfriamiento asociado con la evaporación, dando lugar a productos de muy buena calidad.

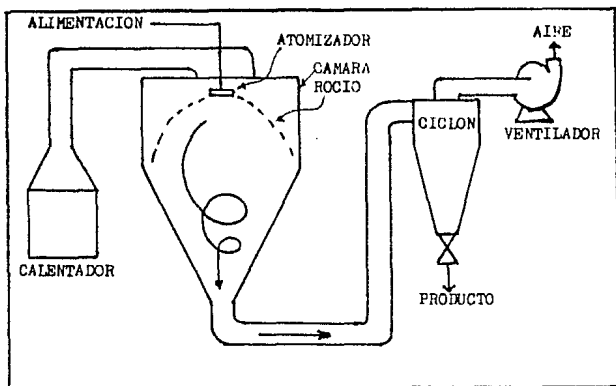


FIG (5). DIAGRAMA DEL SECADOR EMPLEADO

El calentador lleva el aire a la temperatura deseada, este entra a la cámara y después de la evaporación de la humedad esta corriente se enfría a su temperatura de salida. El producto seco y el aire se separan en el colector (ciclón) de producto y el aire húmedo se elimina a la atmósfera gracias al ventilador.

Con el secado se pretende conservar el producto por más tiempo, ahorrar peso y facilitar el transporte así como completar el proceso de manufactura (20).

III.2) VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO POR ASPERSION

En comparación con otras técnicas de secado, el secado por aspersión ofrece las siguientes ventajas (6):

- 1) Es una operación que puede llevarse a cabo en un solo paso y obtener de una solución un producto seco.
- 2) Es un proceso continuo.
- 3) Tiene bajo costo de mantenimiento por tener pocas piezas en movimiento.
- 4) Bajo costo de mano de obra. Un solo operador se puede hacer cargo del equipo aún en instalaciones grandes.
- 5) Poca corrosión en el equipo ya que el producto hace contacto con las paredes cuando ya está seco.
- 6) Los productos obtenidos son muy solubles.
- 7) Conserva los materiales sensibles al calor, tanto por los bajos tiempos de residencia como porque la temperatura de la gota está muy por debajo de la temperatura del aire de secado.
- 8) Se pueden introducir corrientes de aire frío a la cámara y a los ductos para enfriar el producto.
- 9) Es posible encapsular productos (sabores y aromas).
- 10) Un secador diseñado para un producto específico puede utilizarse para otros materiales.
- 11) Las propiedades del producto se pueden modificar cambiando las condiciones de operación. Por ejemplo, se puede variar la humedad final de un 20 a un 0.2% aumentando o disminuyendo el gasto, se puede regular la densidad del producto cambiando las temperaturas de entrada y salida, el sistema de atomización o la concentración de sólidos.

- 12) El arranque y parado del equipo son rápidas.
- 13) El secado se puede llevar en circuito cerrado, operando con un gas inerte o solvente sobrecalentado como medio de secado. Esto hace posible recuperar el solvente y evitar el contacto de oxígeno para productos susceptibles a oxidación.
- 14) Bajos tiempos de residencia en una atmósfera caliente.
- 15) El producto que sale del secador puede estar listo para envasarse sin requerir tratamientos posteriores como molienda o tamizado.
- 16) El flujo de aire respecto al producto puede ser en contracorriente, paralelo y mixto.

Las principales desventajas son (6):

- 1) Se requiere más calor para secar ya que la alimentación tiene un alto contenido de agua (el líquido debe ser bombeable).
- 2) El problema de recuperar los polvos incrementa el costo de operación, especialmente cuando se necesitan filtros de bolsa o barredores adicionales en la cámara y ciclón colector.
- 3) Alto costo inicial.
- 4) Altas velocidades de rotación en discos atomizadores y presiones elevadas para boquillas.
- 5) Pérdidas hasta de un 20% en la recuperación de polvos por arrastre del ciclón cuando se trabajan bajas concentraciones.
- 6) Se requieren espacios grandes para instalar el equipo.

III.3) ETAPAS DEL SECADO POR ASPERSION

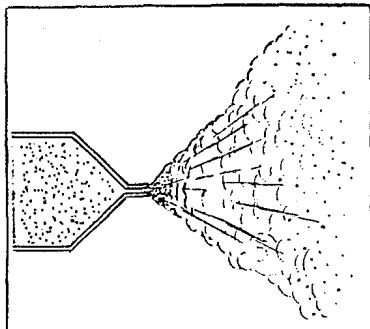
Las principales operaciones involucradas en el secado por aspersión son: la atomización, el mezclado de la corriente aire - rocío y el secado de las gotas.

III.3.1) ATOMIZACION

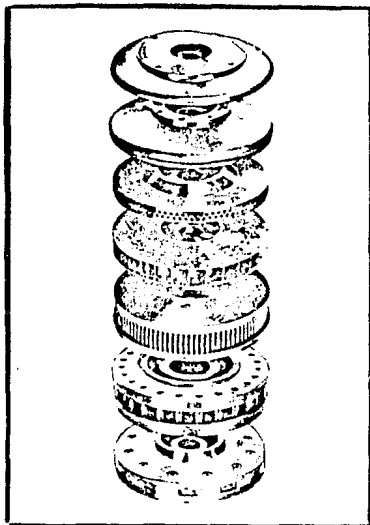
La atomización constituye el paso más importante en la operación de secado, de éste depende el tamaño promedio de las partículas y su distribución, la dirección del rocío y la energía requerida para formarlo. La atomización debe garantizar que las partículas más grandes sequen antes de llegar a la pared y de producir pocos finos debido a que éstos pueden sobrecolectar o ser arrastrados por el ciclón (1).

El principal efecto de la atomización es producir una alta relación superficie - masa, favoreciendo la velocidad de evaporación. Por ejemplo, un atomizador que de lugar a partículas de 100 micras crea una superficie de 60 metros cuadrados por litro de solución. Un segundo efecto es el de crear un producto finamente dividido con características físicas especiales en cuanto a densidad y forma de las partículas. Los atomizadores empleados en la industria son de dos tipos: boquillas a presión y discos centrífugos (figura 6) (10).

La atomización por disco utiliza la fuerza centrífuga para fraccionar cualquier líquido que fluya por gravedad o que puede ser bombeado por una línea directa al disco. Este sistema de atomización es el más utilizado en la actualidad, y capacidades de 27000 Kg/Hr se pueden obtener con un solo disco (6). Las



A) BOQUILLA A PRESION



B) DIFERENTES DISCOS ATOMIZADORES

FIG. 6 PRINCIPALES SISTEMAS DE ATOMIZACION

principales ventajas de la atomización por disco son (13):

- Se pueden atomizar soluciones con sólidos gruesos en suspensión.
- La operación del equipo no se ve afectada por cambios en la presión de alimentación.
- Los problemas por erosión no son de importancia.
- Se pueden manejar gastos de \pm 25% sin afectar seriamente al diámetro de partícula.
- Son de fácil mantenimiento.
- Los cambios en concentración y gasto pueden compensarse con un cambio en la velocidad de rotación del disco.
- Los costos de energía son más reducidos en comparación con las boquillas.

Las principales desventajas son (1):

- Alto costo inicial.
- Se requieren altas velocidades de giro.
- Por la dirección del rocío se requieren cámaras de mayor diámetro.
- Es difícil adaptarlos para flujo en contracorriente.

Las boquillas a presión consisten en pequeños orificios por los cuales circula la solución que se va a secar. La formación del rocío se basa en la conversión de presión a velocidad cuando el líquido es obligado a pasar por una reducción. Las boquillas a presión se emplean con ventaja cuando no hay sólidos gruesos en suspensión, la viscosidad de la solución es baja y para arreglo en contracorriente.

El tipo de atomizador no solo determina la energía requerida

para la formación del rocío sino el tamaño de las gotas, su dirección y velocidad, que a su vez influyen en el dimensionamiento de la cámara (1).

III.3.2) MEZCLADO AIRE - ALIMENTACION

La interacción del aire caliente y la alimentación tiene una gran influencia en las condiciones de operación y la calidad del producto. Los flujos posibles en secadores por aspersión se clasifican de acuerdo a la dirección de las partículas y el aire en : contracorriente, paralelo y mixto (fig.7) (26).

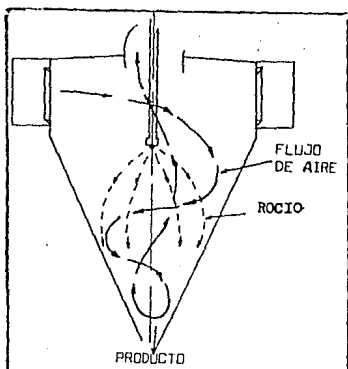
Los secadores con flujo en paralelo predominan en las instalaciones industriales por tener varias ventajas, entre ellas pueden mencionarse diseños más simples y el secado de gran variedad de productos. Dado que la evaporación se lleva a cabo a una corta distancia del atomizador, el aire de entrada se enfría a la misma distancia a casi su temperatura de salida, manteniendo las paredes del secador más frías. La temperatura del producto es menor a la del aire de salida, y humedades finales del 0,2% pueden obtenerse bajo condiciones óptimas de secado (6). Para el secado de materiales sensibles el flujo en paralelo es el más adecuado, permite temperaturas de aire de secado elevadas gracias a que la partícula se encuentra a la temperatura de bulbo húmedo en la fase inicial de secado (10).

En el sistema en paralelo el aire entra por la parte superior de la cámara formando ángulos rectos con el rocío, o bien conducido por medio de ductos y depositado en la parte inferior del

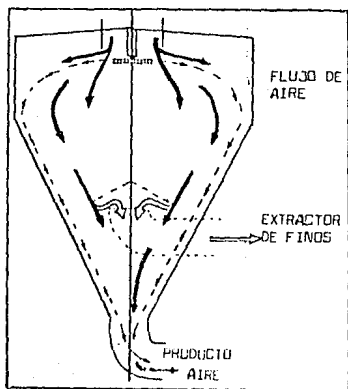
atomizador (fig.7 B). Al flujo de aire puede dársele un giro en sentido contrario al del atomizador (de 10 a 20 RPM) para incrementar la turbulencia y reducir el tiempo de secado, efecto aprovechado para limpiar las paredes en un efecto similar al de un ciclón colector, donde la mayor parte del producto se colecta en la base de la cámara. Las cámaras con fondo cónico y la ausencia de obstrucciones ayudan a prevenir la acumulación de polvo (6).

En el flujo de aire mixto (figura 7 A) el aire entra a través de canales por la parte superior de la cámara. El rocío se introduce en la corriente de aire ascendente que da como ventaja una eficiencia térmica como si se tuviera un sistema en contracorriente. La partícula deja el aire en contracorriente y entra a la corriente de aire caliente en paralelo para la etapa final de secado. Este tipo de secador tiene grandes ventajas para materiales inorgánicos, dan poca cantidad de finos y altas densidades volumétricas, pero tienen tiempos de residencia en el equipo mayores, condición desfavorable para el secado de productos sensibles (10).

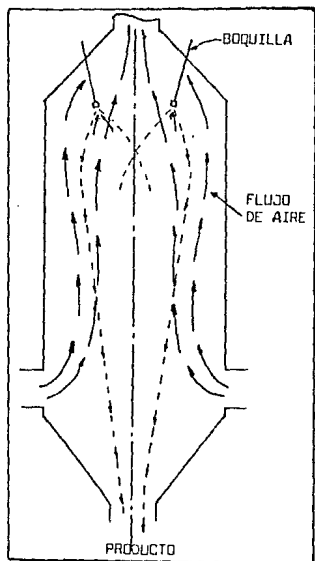
En los secadores en contracorriente (figura 7 C) el aire de secado entra por la parte inferior de la cámara, mientras que la atomización se lleva a cabo en la parte superior. Dado que la partícula está en el periodo de velocidad decreciente al hacer contacto con el aire caliente de entrada, se debe tener cuidado con un posible sobrecalentamiento. Este tipo de arreglo es práctico cuando la densidad de las partículas es lo suficientemente alta para vencer la gravedad y la fuerza del aire ascendente, y cuando el producto no se afecta por la temperatura (45).



A) SECADO EN FLUJO MIXTO



B) SECADO EN PARALELO



C) SECADO EN CONTRACORRIENTE

FIG. 7 TIPO DE FLUJO EN SECADORES

III.3.3) SECADO DE LA PARTICULA

Como en el secado convencional, el secado por aspersión se lleva a cabo en dos periodos: el de velocidad constante y el de velocidad decreciente. Dado que las partículas están finamente divididas, el tiempo involucrado en ambos periodos es muy reducido, dificultando el análisis y limitando el estudio de secado a la resolución de complejas ecuaciones diferenciales o bien a relaciones obtenidas por análisis dimensional (11).

Se ha definido al agua libre (6) como aquella que se encuentra en la superficie o que puede difundir rápidamente a ésta para así mantener el llamado período de velocidad constante. Durante este, el calor sensible proporcionado por el aire es igual al calor latente del requerido para evaporar el solvente, y la gota se comporta como si se tuviera un compuesto puro, siendo su temperatura la de bulbo húmedo. En el secado por aspersión la mayor parte del solvente se elimina en el período de velocidad constante a diferencia de los demás tipos de secado.

Después de haberse evaporado una cierta cantidad de líquido, se forman gradientes de concentración dentro de la gota, se da la difusión del solvente a la superficie y del soluto al centro de la partícula. La gota va disminuyendo de tamaño debido a la evaporación y el soluto alcanza su valor de saturación, formando una costra en la superficie que puede contraerse o hacerse impermeable al soluto. En este punto se alcanza la humedad crítica (cambio de velocidad constante a decreciente) en el que la evaporación del solvente ha dejado una partícula semiseca cuya superficie ya no está húmeda. La temperatura y la diferencia de

humedad se convierten en las variables dominantes y la temperatura de la partícula se incrementa gradualmente por arriba de la temperatura de bulbo húmedo (34).

Al alcanzar la humedad crítica hay un decremento en la velocidad de evaporación como resultado de la resistencia ofrecida por la costra formada en la superficie. Si se alcanza la temperatura de ebullición del solvente, puede formarse vapor dentro de la partícula. Dependiendo de las propiedades de la costra formada será el efecto de la presión ejercida por el vapor. Si la estructura es muy porosa, el líquido puede ser expulsado por los poros hacia la superficie. En el caso contrario, si la costra es impermeable y presenta características 'plásticas' las partículas se 'inflarán', si la presión interior es muy alta se fracturarán, sino al enfriarse se colapsan y contraen al interior (26). Si la costra es rígida se dará el rompimiento de la partícula, que es lo más común en el secado en paralelo. Una vez que la costra se fractura la humedad se puede mover por capilaridad, definida como el movimiento de agua a través de los intersticios de los sólidos mediante un mecanismo en el que interviene la tensión superficial. Los capilares se extienden desde pequeños 'recipientes' dentro de la partícula hasta la superficie de secado. Una vez que el líquido se agota estos canales se llenan de aire, condición que se favorece con el incremento en la concentración y explica la formación de partículas grandes y huecas en la mayoría de los productos.

Existe también el agua combinada, que es aquella que está interactuando con proteínas y carbohidratos y está en forma 'inmóvil'. Eliminar esta humedad requiere un incremento adicional

en la temperatura de la partícula, acercándose a la del aire que le rodea, trayendo como consecuencia cambios irreversibles en la calidad del producto (6).

Las velocidades de secado en el período decreciente varían de una solución a otra. Las propiedades de la estructura sólida por la que se ha de desplazar la humedad no se pueden determinar en este tipo de secado, son dependientes no solo de la naturaleza del material sino de las condiciones bajo las cuales se seca. Estas condiciones involucran la humedad del aire, la temperatura de entrada y salida del secador, el diámetro de partícula y la naturaleza del sólido.

El movimiento de las partículas en la cámara es de suma importancia para el diseño de secadores. Se puede considerar que la partícula se mueve en un plano horizontal (fig.8). La trayectoria se divide en dos secciones: en la primera la partícula es arrojada por el atomizador y está sujeta al efecto de la entrada de aire en contracorriente. Hay un decremento progresivo en la velocidad hasta alcanzar un valor 0 en el punto E, donde la velocidad en el eje X es cero. En la segunda sección la partícula es arrastrada por el aire, y el secado posterior se lleva en paralelo. El aire de secado entra tangencialmente, adquiriendo un movimiento circular dentro de la cámara, y las partículas se mueven en un campo centrífugo en la segunda sección de secado (6).

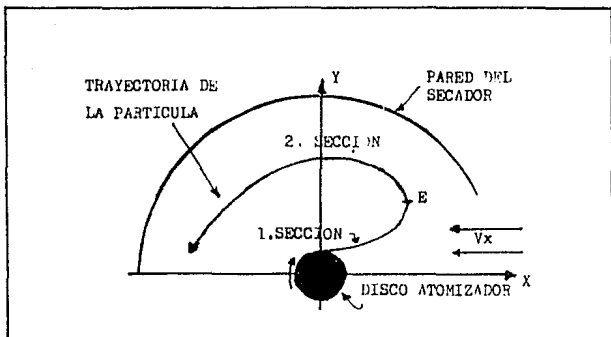


FIG. (8) MOVIMIENTO ESQUEMATICO DE LA PARTICULA
EN UN PLANO HORIZONTAL

Para llevar a cabo los cálculos básicos del secado por aspersión hay que referirnos al uso de la carta psicrométrica. La psicrometría relaciona mezclas de gases incondensables (aire) con condensables (agua). Estas relaciones son básicas en el proceso de secado de alimentos por el papel que juegan en las fuerzas involucradas en la remoción de humedad (53).

El proceso de secado por aspersión se puede representar en la carta psicrométrica, siendo un método práctico que permite obtener en forma rápida las características del aire de secado a la entrada y salida del secador, útiles en los balances de materia y energía.

III.4) CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO

El secado por aspersion da lugar a partículas de diferentes tamaños, de forma esférica o oval, que pueden ser rígidas o huecas. Las partículas huecas son de apariencia mas atractiva y dan menores densidades volumétricas, factores que contribuyen a hacer el producto mas atractivo para el caso de ventas. Las partículas rígidas, por la ausencia de gases atrapados, presentan mayores densidades y son menos solubles. Para partículas coloreadas, las de mayor tamaño tienden a verse más oscuras e intensas en tono que partículas de igual composición pero mas pequeñas.

Las características de los productos obtenidos dependen de las propiedades del material que se va a secar, del solvente y las condiciones de operación. Dentro de los problemas que se pueden presentar en el secado de betalaínas encapsuladas con un hidrolizado de almidón (maltodextrina) encontramos:

- 1) caramelización y cambios de color
- 2) polvos higroscópicos y atarronamiento
- 3) adherencia de polvos a cámara y ductos
- 4) producción de finos
 - baja solubilidad
 - alta densidad
 - pérdida de color
 - pérdida de polvos por arrastre del ciclón.

1) La caramelización se define como la degradación anhidra de azúcares y ácidos polihidroxílicos en ausencia de aminoácidos y se presenta cuando estos se calientan por arriba de su temperatura de fusión, formándose pigmentos con tonalidades que van del amarillo al café. Los azúcares puros caramelizan

rápido a temperaturas superiores a los 100 C, y compuestos aminados actúan como catalizadores. La temperatura de fusión de los azúcares depende de la humedad del producto, llevando una relación inversa. Por ejemplo, la glucosa anhidra funde a 147 C, y la forma hidratada a 102 C. Bajo condiciones de humedad constante la temperatura de fusión se incrementa al aumentar el peso molecular (54-57).

2) Los polvos higroscópicos y aterramiento ocurren cuando las condiciones de secado han sido drásticas, de tal forma que la humedad final del producto no se encuentra en equilibrio con la humedad del aire que le rodea. Para compensar esta diferencia, los polvos captan agua del medio formando una solución saturada en la superficie de las partículas, tornándolas pegajosas y capaces de formar puentes de unión (12). Dichas fuerzas pueden ser de tipo Van Der Waals o puentes de hidrógeno, y son dependientes de la distancia entre partículas así como del número de puntos de contacto.

3) La adherencia de polvos a cámara y ductas se debe a las siguientes causas:

a) Las partículas de mayor diámetro no alcanzan a secar antes de hacer contacto con las paredes, quedando adheridas.

b) Al cambio de la estructura del azúcar, pasando de una forma seca estable a un estado viscoso (fusión), fenómeno conocido como colapsamiento (12). La transformación en los productos deshidratados por la pérdida o ganancia de humedad son de gran importancia en la industria. El que las partículas se quemen por

adherencia a las paredes y ductos, dificultando la recolección de los polvos es una consecuencia del colapsamiento.

La temperatura de colapsamiento marca la transición del polvo seco estable al estado viscoso, y es dependiente de la humedad del producto así como del peso molecular. Algunos ejemplos son (12):

CARBOHIDRATO	TEMP. DE COLAPSAMIENTO (C)	HUMEDAD (%)
lactosa	101	0
maltosa	96	0
sacarosa	55	0
maltodextrina 250	204	0
maltodextrina 100	249	0
maltodextrina 100	150	10

Cuando se tiene maltodextrina en solución, incrementar la concentración aumenta la temperatura de colapsamiento.

Tanto las partículas colapsadas como las húmedas quedan adheridas a las salientes, paredes y cambios de dirección en los ductos, provocando el taponamiento, pérdida de la calidad del producto y afectando la operación del equipo.

4) Los polvos finos se obtienen principalmente por la baja concentración de sólidos en la solución que se va a secar o bien por las altas velocidades de giro del disco atomizador. Los finos presentan una mayor área de exposición al calor, por lo que sobrecalientan con mayor facilidad. Además, por su bajo peso pueden ser arrastrados y arrojados a la atmósfera por el ciclón.

Por tener una estructura poco porosa son de difícil reconstitución, incrementan los costos de recuperación (uso obligado de filtros) y favorecen el riesgo de ignición (28).

El análisis de los productos secados por aspersión se basa en las características siguientes:

- distribución de tamaños
- esfericidad
- solubilidad
- pérdidas de color
- oxidación
- color
- densidad
- humedad

De éstas, la densidad ha recibido mayor atención por su relación con el costo de empaque y distribución.

III.5) SECADO DE BETALAINAS

La información referente al secado por aspersión de betalaínas es muy limitada. Wiley y Lee (44) obtuvieron polvos de betabel. En su experimentación manejan un equipo de difusión en contracorriente para la extracción de color, utilizando temperaturas de 70 y 74 C. Este equipo tiene un tornillo sinfin que transporta el betabel molido en contracorriente con el solvente (agua). El jugo obtenido en esta operación se clarificó con tierra de diatomeas y concentró en un evaporador Flash Buchner FE-2 a 50 C por una hora hasta obtener 26 grados Brix. Por último la concentración de sólidos se ajustó al 30% con un hidrolizado de almidón y se secó en un secador modelo PORTATIL de NIRD ATOMIZER con temperaturas entre 135 y 150 C. No se reportan temperaturas de salida, el sistema de atomización o las RPM. Las pérdidas de color se estimaron en un 12.7%.

Main, Francis y Clydesdale (24) secaron antocianinas, color natural ligeramente más estable que las betalaínas. El secado se realizó en un secador NERCO-NIRD, ajustando el contenido de sólidos al 30 % con maltodextrina y utilizando temperaturas de secado de 175 a 200 C. La atomización fue por medio de boquillas en un sistema en paralelo. Los resultados obtenidos señalan pérdidas despreciables de color cuando la temperatura de salida es de 90 C. En el proceso de extracción de antocianinas se utiliza como solvente alcohol etílico, con características muy diferentes a las del agua.

IV METODOLOGIA

IV.1) OBJETIVOS E HIPOTESIS

OBJETIVOS:

- 1.- Comprender el funcionamiento de un secador por aspersión aplicando fundamentos teóricos.
- 2.- Fijar las condiciones de operación más adecuadas para el secado de betalainas a partir de datos experimentales que permitan evaluar el proceso, calculando el costo energético aproximado de la operación bajo las diferentes condiciones empleadas.
- 3.- Establecer la relación que guardan las variables seleccionadas con el gasto, pérdida de color, costo y eficiencia.
- 4.- En base a los resultados obtenidos establecer si es o no conveniente el secado de betalainas con la tecnología establecida.

HIPOTESIS :

- 1.- La pérdida de color esta influenciada por la temperatura y velocidad de giro del disco atomizador.
- 2.- Si las propiedades de la solución que se va a secar no se modifican, la temperatura tiene una relación proporcional con el gasto y producción, reduciendo el costo final del producto.
- 3.- Mayores concentraciones en la solución a secar reduce la capacidad del equipo debido a la formación de partículas de

mayor diámetro que oponen mayor resistencia al paso del solvente, pero habrá un incremento en la producción. Al aumentar la producción se reducirá el costo del producto, pero el proceso será menos eficiente debido al aumento en la temperatura de salida del secador.

4.- Por las propiedades del acetato de amonio, éste no es el solvente más adecuado.

IV.2) PROCESO DE EXTRACCION

La extracción de betalainas en el presente estudio se realizó de acuerdo a la patente desarrollada (60):

LAVADO : consiste en eliminar con agua corriente la tierra adherida a la superficie y tallos.

ESCALDADO : se hace con la finalidad de inactivar con vapor de caldera las enzimas que degradan el color (38).

MOLIENDA : el betabel es triturado en un molino de cuchillas y centrifugado para obtener el jugo.

FILTRACION : se utiliza tierra de diatomeas como medio filtrante y una centrífuga de canasta. En esta operación se remueven impurezas como tierra y partículas de betabel que de no ser eliminadas contaminarían la columna de intercambio iónico.

PURIFICACION : esta operación se lleva a cabo en una columna de intercambio aniónico, en la que se separa el color de otros

componentes del betabel como son azúcares y proteínas.

CONCENTRACION : para la concentración de la solución se empleo un evaporador centrífugo CENTRI-THERM CT-1B-2. La concentración final máxima que se pudo obtener de la solución de acetato de amonio fue 10 molar (aprox.: 40% en peso). Los sólidos se ajustan al 1% con maltodextrina como encapsulante, concentración que se tiene que mantener constante con el fin de respetar la formulación dada y de no diluir el color. La pérdida de color en esta operación es despreciable si se realiza en una etapa. La temperatura de la solución a la salida del evaporador fue de 30 C y se utiliza como alimentación al secador.

SECADO : El secador modelo PRODUCTION MINOR de NIRO ATOMIZER fue utilizado para la obtención del producto y la investigación concerniente a las condiciones mas adecuadas para el secado. El sistema de atomización es por disco, con velocidades de rotación de 15, 20 y 24 mil revoluciones por minuto (RPM), el flujo de alimentación en paralelo (fig.7 B) y la trayectoria de la partícula se muestra en la figura 8.

IV.3) EXPERIMENTACION

Para establecer las condiciones de trabajo, fijar las constantes y las variables así como los rangos de variación, se hicieron corridas de prueba, empleando inicialmente temperaturas de secado de 200 C y de salida de 125. A estas temperaturas el producto caramelizó y se pegó a las paredes y ductos. La tempera-

tura se redujo hasta que a 175 C de entrada y 115 C se obtuvieron los primeros polvos. Se observó que temperaturas de salida menores a 115 C dan lugar a productos húmedos que se adhieren a los ductos y bote colector, por lo cual se decidió trabajar esta temperatura como constante, variando solo la temperatura de entrada en 145, 155, 165 y 175 C.

Para las corridas de prueba la temperatura de salida y capacidad de la cámara se determina bajo el criterio de que ninguna partícula húmeda debe chocar con la pared del secador. Esto se puede observar experimentalmente a través de las mirillas y bote colector.

El secador cuenta con un sistema (papalote) para regular el flujo de aire que entra a la cámara. Las funciones de este son:

- 1) Regular el gasto de aire.
- 2) Regular la temperatura de la cámara.
- 3) Control indirecto de la humedad final del producto.
- 4) Regula el tiempo de residencia.

La humedad del aire dentro de la cámara se debe mantener lo mas baja posible para evitar la adherencia de polvos a ductos o a la salida de producto con humedades elevadas. Además, la baja concentración de las soluciones a secar hace que prácticamente se seque solvente puro, por lo que se requiere un mayor gasto de aire. Por estas razones se decidió trabajar el papalote totalmente abierto, con un gasto de aire promedio de 380 Kg/Hr, reduciendo con esto el riesgo de condensación del ácido acético.

El papalote totalmente cerrado incrementa la temperatura de la cámara por haber una menor circulación de aire, de tal forma

que las temperaturas más bajas no podían obtenerse prácticamente con las resistencias menores. Además, cerrar el papalote incrementa el tiempo de residencia en el equipo, aumentando así el riesgo de sobrecalentamiento, que sería muy perjudicial dada la sensibilidad del producto a la temperatura.

IV.4) SECUENCIA DE CALCULO

Las determinaciones realizadas necesarias para efectuar los calculos fueron:

Obtener las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire ambiente con un psicrómetro de onda. Con estas temperaturas se obtiene de la carta psicrométrica la humedad del aire (Y) que se introduce al secador.

Para calcular el gasto de aire es necesario medir su velocidad en uno de los ductos. Para esto se utilizó un anemómetro de paletas. Multiplicando la velocidad del aire en el ducto por el área de éste y dividiendo entre el volumen húmedo (ec.6) se obtiene el gasto, para el caso del papalote totalmente abierto fue de 380 ± 10 Kg/Hr. El valor reportado en el manual del equipo es de 400 Kg/Hr.

La concentración de color se efectuó en un espectrofotometro Beckman modelo 35, tomando en cuenta las absorbancias a 537 nm para los rojos y 600 nm como longitud de onda de referencia.

La densidad de los polvos se hace en una probeta con un peso conocido de producto. A esta probeta se le daban 100 golpes para provocar la compactación del polvo (33).

Por último, las ecuaciones empleadas para los cálculos restantes fueron:

$$\text{VOLUMEN HUMEDO} = V_h = ((1/29) + (Y/18)) * .082 * ((T_{as} + 273) / p_t) \dots\dots(6)$$

$$\text{EFICIENCIA GLOBAL} = E_g = (T_{as} - T_s) / (T_{as} - T_a) \times 100 \dots\dots(7)$$

$$\text{COSTO/ GRAMO} = 1/Q \times 1/C \times KW \times 100 \dots\dots(8)$$

$$\text{PRODUCCION} = P = Q \times C \dots\dots(9)$$

donde

- KW = Kilowatt de los motores y las resistencias
- 100 = precio del KW/Hr proporcionado por la compañía de luz y fuerza el 9/00/1988

IV.5) RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO

Del punto IV.3 se resumen las condiciones de trabajo en:

constantes:

- temperatura de alimentación al secador30 C
- concentración de sólidos en la alimentación... 1%
- temperatura de salida del secador.....115 C
- concentración de solución de acetato..... 10 M
- gasto de aire de secado.....3804-10 Kg/Hr

variables:

FACTOR	NIVEL DE VARIACION	RANGO
temperatura de secado (C)	4	145,155,165,175
RPM del disco atomizador	2	15000,24000

INFORMACION GENERAL

 TABLA V. PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES DE LA SOLUCION A SECAR

ACETATO DE AMONIO -----	PESO ESPECIFICO.....1073 kg/m ³
	PESO MOLECULAR.....77.08 gr/mol
	TEMPERATURA DE EBULLICION... *
	TEMPERATURA DE FUSION114 C
ACIDO ACETICO -----	CALOR LATENTE.....94.5 Kcal/kg
	TEMPERATURA DE EBULLICION...118 C
	PESO MOLECULAR.....60 gr/mol
	PESO ESPECIFICO.....1049 Kg/m ³
AMONIACO -----	CALOR LATENTE.....320 Kcal/kg
	PESO MOLECULAR.....17 gr/mol
AGUA-----	CALOR LATENTE.....538 Kcal/Kg
	PESO ESPECIFICO.....998 Kg/m ³
	PESO MOLECULAR.....18 gr/mol
	TEMPERATURA DE EBULLICION... 100 C

 * presenta descomposición

(51,51,55)

V) RESULTADOS

En la primera etapa experimental se hicieron un total de 16 corridas. Los resultados se muestran en la tabla 6.

 TABLA VI. PERDIDA DE COLOR (%) BAJO LAS DIFERENTES CONDICIONES EMPLEADAS

TEMPERATURA	RPM DEL DISCO	
	15000	24000
145	56.72	62.31
	54.86	58.50
155	57.89	59.10
	61.69	57.50
165	60.85	60.00
	51.20	57.86
175	56.09	53.00
	50.63	64.60

Efectuando el análisis de varianza en un factorial de 2×4 para los resultados obtenidos se obtiene la tabla ANOVA :

 TABLA VII. TABLA ANOVA PARA RESULTADOS TABLA VI

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	VARIACION	F cal	F teo 95%
TRATAMIENTOS	7	80.10	11.44	0.62	3.50
TEMPERATURA	3	18.55	6.18	0.33	4.07
RPM	1	32.89	32.89	1.77	5.32
INTERACCION	3	28.65	9.55	0.52	4.07
ERROR	8	148.53	18.56		
TOTAL	15	228.63			

De la tabla 7 los valores de F calculados son menores a los obtenidos de tablas, indicando que ni la velocidad de rotación del disco ni la temperatura tienen un efecto sobre la conserva-

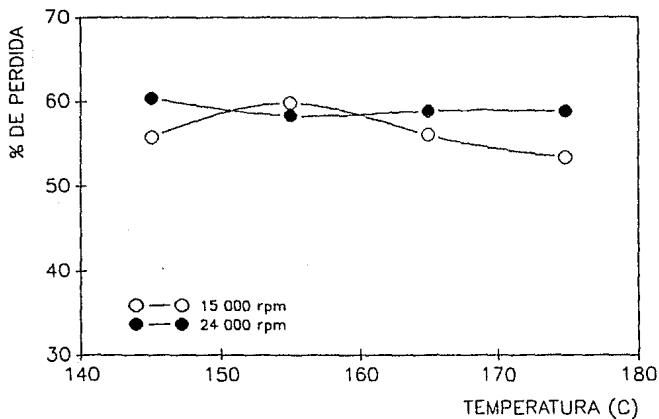
ción del color, y la pérdida global es superior a la reportada (44), por lo cual se rechaza la primera hipótesis planteada. El efecto de ambas variables se presenta en las gráficas 1 y 2.

Hay que mencionar que el volumen de la solución que se introdujo al secador dependía de la concentración de color del lote de betabel así como de los kilogramos procesados, por lo que no fue constante. El volumen influye en el tiempo de operación del equipo, y dada que los polvos se acumulaban en los ductos, era de esperarse una pérdida de color mayor. Esto no ocurrió en la práctica, y volúmenes que diferían hasta en un 30% presentaron pérdidas de color similares.

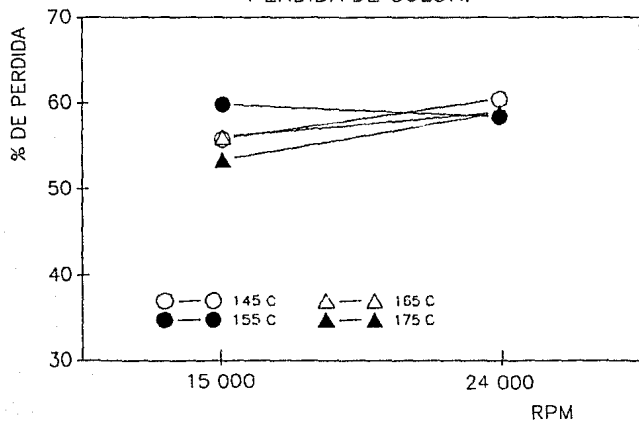
Además de la elevada pérdida de color, los polvos obtenidos presentaron características indeseables de calidad. Destacan la alta higroscopicidad, la adherencia de éstos a los ductos, la caramelización (en corridas a 175 C), el aterronamiento y la baja densidad debida principalmente a la baja concentración de sólidos en la solución, que da lugar a un producto de muy difícil reconstitución. Se han reportado (34) que en soluciones con concentraciones del 1% la partícula reduce su tamaño en un 75% solo por la evaporación del solvente, se producen muchos finos, los cuales sobrecalientan con mayor facilidad, presentan dificultades de flujo en ductos y son fácilmente arrastrados por el ciclón, características presentes en todas las corridas realizadas.

La presencia de producto caramelizado, adherencia en ductos y aterronamiento del polvo son provocados por un sobrecalentamiento de la partícula. Para confirmarlo se realizaron 3 pruebas adicionales:

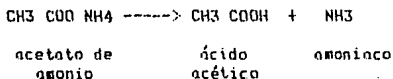
GRAFICA 1. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA PERDIDA DE COLOR.



GRAFICA 2. INFLUENCIA DE LAS RPM EN LA PERDIDA DE COLOR.



a) Para obtener el perfil de temperaturas se preparó una solución 10 molar de acetato de amonio, se colocó en un matraz con un termómetro y se sometió a calentamiento. Los resultados se muestran en la gráfica 3, de donde destaca el incremento drástico de la temperatura en la etapa final y los 145 C registrados como temperatura máxima. En la gráfica se pueden observar 3 períodos. En el primero, comprendido de A a B, se da la evaporación principalmente de agua, por ser el componente de menor temperatura de ebullición. En el segundo, a partir del punto B, la temperatura se incrementa y se da la evaporación de agua y ácido acético. Por último, en el punto C se alcanza la temperatura de ebullición del ácido acético, y además del incremento en la temperatura se da la descomposición de acetato de amonio según la reacción



b) Del capítulo II.3 se obtienen los datos de las constantes y el tiempo de vida media con el fin de evaluar la constante k_0 y extrapolar a 145 C registrados en el calentamiento de la solución de acetato de amonio. Los datos empleados fueron (tabla 2 a pH 5):

$$\begin{array}{ll} E_a = 17.6 \text{ Kcal/mol} & R = .00198 \text{ Kcal/mol K} \\ k = 0.01 \text{ min}^{-1} & T = 65 \text{ C} = 338 \text{ K} \end{array}$$

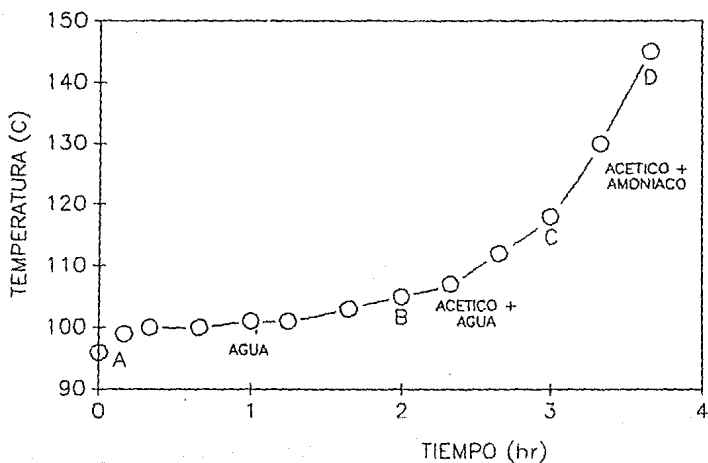
sustituyendo valores en las ecuaciones 4 y 5 se obtiene

$$\log k_0 = 9.414 \quad \text{y} \quad k_0 = 2.59 \text{ EXP } 09$$

Para el caso de extrapolar a 145 C = 418 K

$$k = 1.53 \text{ min}^{-1} \quad ; \quad t(1/2) = 27.25 \text{ seg} = .454 \text{ min}$$

GRAFICA 3. PERFIL DE TEMPERATURAS PARA EL CALENTAMIENTO DE UNA SOLUCION DE ACETATO.



c) Para mostrar la influencia del solvente, se prepararon soluciones al 1% utilizando agua como solvente y los polvos obtenidos en las corridas con acetato de amonio. Se empleó una temperatura de secado de 165 C, que fué la más alta empleada sin que se presentara caramelización y 15000 RPM, que son las menores revoluciones que se pueden obtener en el equipo. La tabla 8 muestra los datos comparativos de las corridas con y sin acetato.

 TABLA VIII. INFLUENCIA DEL ACETATO DE AMONIO A 165 C, 15000 RPM Y CONCENTRACION DEL 1%

	TEMP. DE SALIDA (C)	PERDIDA DE COLOR (%)	COSTO (\$/gr)	GASTO (Lt/Hr)	EFICIENCIA (%)
AGUA	100	11.7	27.82	7.50	46.3
ACETATO	115	56.0	42.85	4.87	35.5

Los resultados obtenidos en las 3 pruebas muestran: 1) un sobrecalentamiento de la partícula por arriba de la temperatura de bulbo húmedo; 2) el tiempo de vida media obtenido por extrapolación indica que a 145 C se requieren solo 27.2 segundos para perder la mitad del color, pérdida equivalente a la obtenida en todas las corridas. Si tomamos en cuenta que a 100 C el tiempo de vida media es de 7.1 minutos (tabla 3), se puede suponer que el incremento en la temperatura esta por arriba de 100 C, y puede estar muy cercana a los 145 C, que se justifica por la higroscopicidad y aterronamiento de los polvos, 3) cambiar el acetato de amonio por agua reduce la pérdida de color en un orden de magnitud de 5, y el resultado obtenido cae dentro del rango reportado (44). Los polvos obtenidos no caramelizaron; no eran

higroscópicos ni se adhirieron a los ductos, permaneciendo hasta un mes en almacenamiento sin que se presentara aterramiento, aunque tienen el inconveniente de un baja densidad (0.7 gr/cm³), son de difícil reconstitución y su costo sigue siendo elevado. Con esto se comprueba que el acetato de amonio, por su alta temperatura de ebullición lleva al sobrecalentamiento de la partícula y por consiguiente a una pérdida de color elevada, por lo que se acepta la hipótesis planteada de que el acetato de amonio no es el solvente mas adecuada.

Analizando la tabla 8, se ve la importancia de la temperatura de entrada y salida sobre la eficiencia de la operación. Consideremos el secador trabajando a 165 C de temperatura de entrada y 115 de salida (corrida con acetato). La eficiencia global sería, suponiendo temperatura ambiente de 20 C (ecuación 7):

$$E_g = (165 - 115) / (165 - 20) * 100 = 34.5$$

Si reducimos la temperatura de salida en 15 C, que es el caso del cambio de solvente por agua:

$$E_g = (165 - 100) / (165 - 20) * 100 = 44.8$$

esto es, una mejora en el aprovechamiento de calor del 30%. Si se hubiera incrementado la temperatura de entrada en 15 C respecto a las condiciones iniciales buscando con esto mejorar la eficiencia tendríamos:

$$E_g = (180 - 115) / (180 - 20) * 100 = 40.6$$

equivalente a un 15% de mejora en el aprovechamiento de calor, que es la mitad de la obtenida con un decremento de igual magnitud en la temperatura de salida. Con esta se quiere mostrar que incrementar la temperatura de aire de secado tiene menos peso sobre la eficiencia global comparado con la reducción en igual

proporción de la temperatura de salida. Por esta razón el cambio de solvente por agua incrementa la eficiencia, con el incremento del gasto aumenta también la producción, factores de mucho peso en la operación práctica del equipo.

Por último, la influencia de las variables en las condiciones de operación del equipo se muestran en la tabla 9:

 TABLA IX. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LAS CONDICIONES DE OPERACION DEL EQUIPO

	TEMPERATURA (C)				ANALISIS VARIANZA
	145	155	165	175	
GASTO (Lt/Hr)					
15000 RPM	2.78	4.01	4.99	6.41	S
	2.99	4.05	4.92	6.64	S
24000 RPM	3.68	4.53	5.71	7.41	S
	3.58	4.56	5.54	7.42	S
PRODUCCION (Gr/Hr)					
15000 RPM	27.80	40.10	49.90	64.10	S
	29.90	40.50	49.20	66.40	S
24000 RPM	36.80	45.30	57.10	74.10	S
	35.80	45.60	55.40	74.20	S
COSTO (\$/Gr)					
15000 RPM	52.44	36.36	32.40	27.80	S
	48.76	36.00	32.92	26.83	S
24000 RPM	39.62	32.18	28.37	26.23	S
	40.72	31.97	29.24	26.20	S
EFICIENCIA (%)					
15000 RPM	24.69	30.53	35.21	40.26	S
	24.72	30.53	35.46	40.00	S
24000 RPM	25.00	31.25	35.97	40.26	S
	25.30	30.53	35.71	39.73	S

 * S = SIGNIFICATIVO AL 95%

El análisis de varianza indica que tanto la temperatura como la velocidad de giro del disco atomizador tienen una influencia importante sobre la operación del equipo. Respecto a la velocidad de giro del disco atomizador es necesario señalar que a pesar de que estadísticamente el cambio es significativo, prácticamente el incremento de 15 a 24 mil revoluciones no es justificable. Para aclarar este punto emplearemos la ecuación 10 para calcular la potencia requerida para atomizar (13):

$$P_h = 1.02 \text{ EXP } -8 \times w \times (N \times D_r)^2 \dots \dots \dots (10)$$

donde

- P_h = potencia del atomizador (Hp)
- w = gasto de alimentación (lb/min)
- N = velocidad de giro del atomizador (RPM)
- D_r = diámetro del disco atomizador = 0.2 ft

Esta ecuación muestra una relación exponencial entre la velocidad de giro y la potencia. Tomando como ejemplo los resultados de la tabla 9, obtenemos:

TEMPERATURA (C)	POTENCIA (Hp)		% AUMENTO EN POTENCIA	% AUMENTO EN GASTO
	15000	24000		
145	0.010	0.030	320	26
155	0.014	0.041	284	12
165	0.019	0.052	292	13
175	0.023	0.068	290	13

El consumo de energía es 300% mayor a 24000 RPM en promedio, mientras que el gasto solo se incrementa en un 16% y el costo se reduce en una cantidad similar. De mayor importancia es que los polvos obtenidos a ambas revoluciones presentaron

características similares, sobre todo en las bajas densidades y alta producción de finos, por lo que incrementar la velocidad de giro con concentraciones de solución tan bajas no es recomendable ya que solo lleva a un desperdicio de energía.

Para saber la relación que guardan las variables, se aplicó el método estadístico de contrastes ortogonales. Los resultados se muestran en la tabla 10:

EFECTO	T1	T2	T3	T4	D	r	C12	SUMA DE		
								CUADRADOS	F cal	Fteo
LINEAL	-3	-1	1	3	48.56	80	29.476	3311.90	5.32	
CUADRATICO	1	-1	-1	1	47.47	16	.423	47.47	5.32	

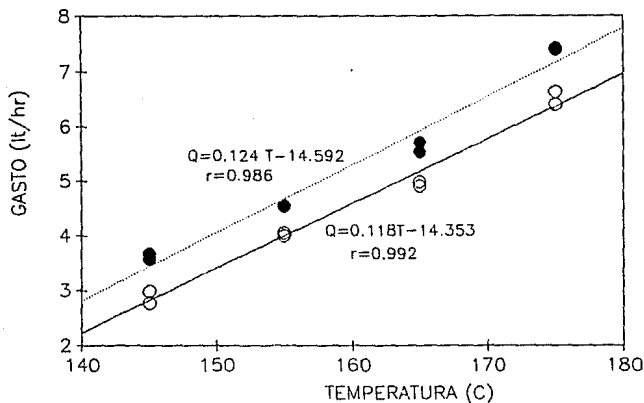
ERROR EN EL ANALISIS DE VARIANZA = .0089

Este análisis es válido para producción y gasto ya que llevan una relación proporcional.

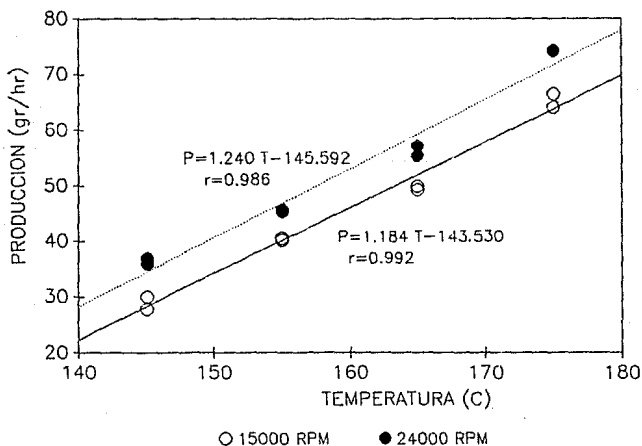
Aunque el efecto lineal y cuadrático son significativos al 95 %, el primero tiene una influencia mucho más marcada en el rango estudiado. Las gráficas 4 y 5 muestran las tendencias, y en ellas se encuentran las ecuaciones de las rectas y el coeficiente de correlación obtenidos por el método de mínimos cuadrados, donde las correlaciones de .992 y .786 son buenas aproximaciones a una recta. Con esto se acepta la hipótesis planteada de que la temperatura lleva una relación proporcional con la producción y gasto si las características de la solución a secar no se alteran.

Para el caso del costo (cc.8) se consideraron los Kwatt totales de las resistencias empleadas. El equipo no cuenta con un

GRAFICA 4. TEMPERATURA VS. GASTO DE ACETATO



GRAFICA 5. TEMPERATURA VS. PRODUCCION

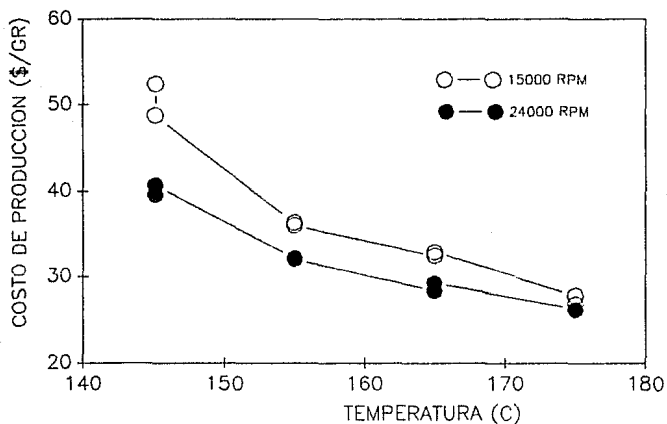


termostato que regula la temperatura, y el control de esta se logra prendiendo y apagando las resistencias. Por corridas a diferente temperatura pueden obtenerse con las mismas resistencias, con la diferencia del tiempo que estarán prendidas cada una de ellas. Esto hace que en este caso se tenga una fuente de error alta en cuanto a los kilowatts totales, reflejándose en el análisis de varianza y contrastes ortogonales. De cualquier manera el comportamiento entre temperatura y costo se muestra en la gráfica 6, en la que se puede observar una relación inversamente proporcional.

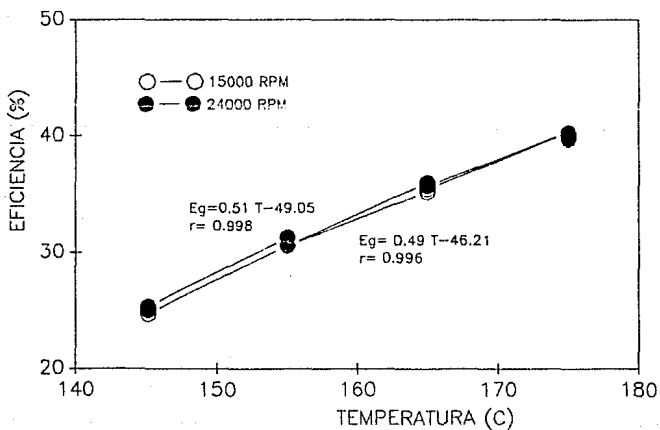
Respecto a la eficiencia (ec.7), esta no toma en cuenta los cambios en las RPM, y dado que solo se basa en las temperaturas, se obtienen líneas rectas con correlaciones de 0.998 y 0.996. La única fuente de variación en este caso es la temperatura ambiente, y dado que esta no se modifica en forma drástica, su influencia es poco significativa. La gráfica 7 muestra el comportamiento de la temperatura vs. eficiencia, se incluyen las ecuaciones de las rectas y la correlación.

Como se vio anteriormente, el secado de batataínas en solución de acetato de amonio no es factible. Para completar la experimentación y dejar las bases para un estudio posterior, se hicieron 6 corridas a diferentes concentraciones con polvos rehidratados en una segunda etapa de investigación. Se trabajo con 165 C como temperatura de aire de secado por ser la más alta utilizada sin que se presentara caramelización y 15000 RPM del disco atomizador. Se pretende ver la influencia de la concentración en la pérdida de color así como en las condiciones

GRAFICA 6. TEMPERATURA VS. COSTO



GRAFICA 7. TEMPERATURA VS. EFICIENCIA GLOBAL



de operación. Los resultados fueron:

 TABLA XI. INFLUENCIA DE LA CONCENTRACION SOBRE LAS CONDICIONES DE OPERACION Y PERDIDA DE COLOR A 165 C Y 15000 RPM

CONCENTRACION (%)	PERDIDA COLOR (%)	GASTO (L/Hr)	PRODUCCION (Gr/Hr)	COSTO (\$/Gr)	Eg (%)
1	12.00	7.57	75.7	21.40	44.82
	11.40	7.80	78.0	20.77	45.45
10	9.22	6.60	660.0	2.45	41.40
	8.96	6.45	645.0	2.51	41.60
20	8.42	5.86	1172.0	1.38	38.62
	8.75	5.79	1158.0	1.40	39.16
ANALISIS VARIANZA	S	S	S	S	S

S= SIGNIFICATIVO AL 95 %

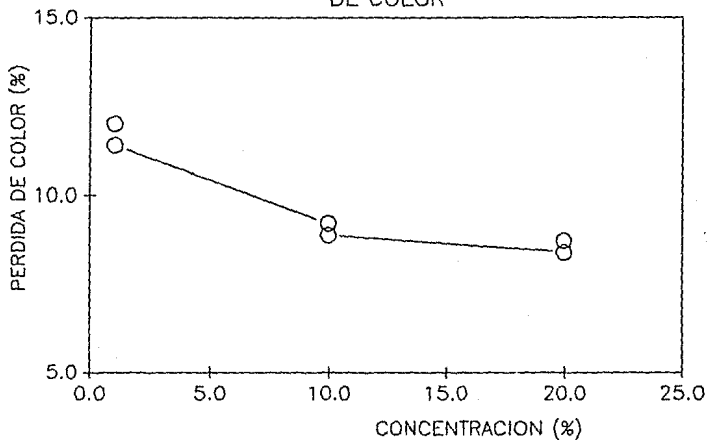
El análisis de varianza para todos los casos fue significativo. La prueba de contrastes ortogonales en este caso se hizo con el fin de obtener la relación entre la concentración y el resto de las variables. Los resultados se muestran en la tabla 12:

 TABLA XII. RESUMEN DE LOS CONTRASTES ORTOGONALES PARA LA TABLA XI

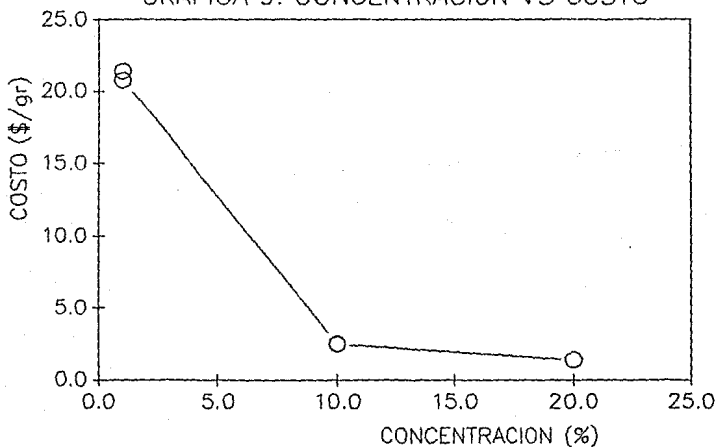
EFFECTO	PERDIDA COLOR(%)	COSTO (\$/GR)	GASTO (LT/HR)	PRODUCCION (GR/HR)	Eg (%)
LINEAL	***	***	***	***	***
CUADRATICO	**	**	-	-	-
***	ALTAMENTE SIGNIFICATIVO AL 95%				
**	SIGNIFICATIVO AL 95%				
-	NO SIGNIFICATIVO				

Para el caso de costo y pérdida de color se tiene un efecto cuadrático importante, indicando que el comportamiento se aleja de la linealidad. Las gráficas 8 y 9 muestran las tendencias. En

GRAFICA 8. CONCENTRACION VS. PERDIDA DE COLOR



GRAFICA 9. CONCENTRACION VS COSTO



ambos casos se pueden tomar logaritmos en ambos miembros con el fin de linearizar, y por el método de mínimos cuadrados obtener la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación. Las ecuaciones obtenidas son:

$$\text{PERDIDA DE COLOR} = 11,666 \times C^{-0,105} \quad r=0,938 \dots\dots(11)$$

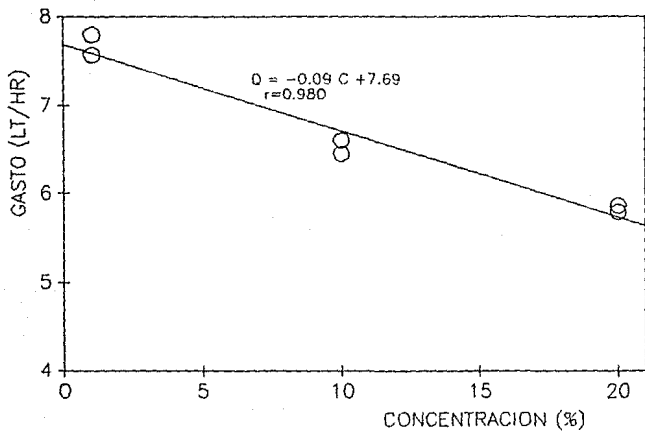
$$\text{COSTO} = 20,893 \times C^{-0,914} \quad r=0,998 \dots\dots(12)$$

Respecto al gasto, producción y eficiencia se obtienen relaciones proporcionales, mostrándose en las gráficas 10, 11 y 12 el comportamiento, la ecuación de la recta y la correlación.

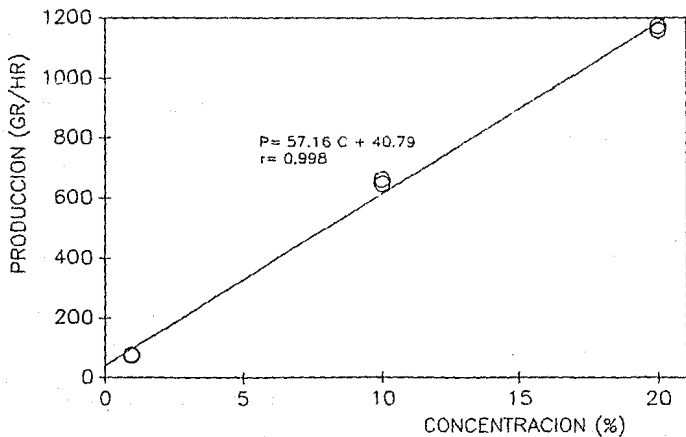
Por las relaciones encontradas se acepta la hipótesis planteada, resaltando los siguientes puntos:

- a) La concentración tiene un efecto protector sobre el color.
- b) La pérdida de color está por abajo del rango reportado, a pesar que en este estudio se utilizaron temperaturas mayores.
- c) El gasto de alimentación se reduce debido a la formación de partículas de mayor tamaño que requieren de mas tiempo para secar, ya que hay una resistencia mayor a la difusión del agua.
- d) La producción es uno de los principales factores a considerar desde el punto de vista económico. El incremento en la concentración del 1 al 20% aumenta la producción por un factor de 15 y reduce el costo en una cantidad similar.
- e) El proceso se hace menos eficiente debido al incremento en la temperatura de salida del secador (gráfica 12). Por esta razón resulta más importante aumentar la producción que buscar mejorar

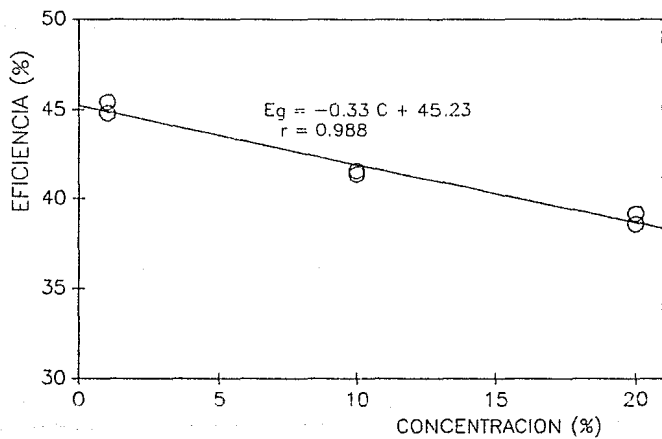
GRAFICA 10. CONCENTRACION VS. GASTO



GRAFICA 11. CONCENTRACION VS. PRODUCCION



GRAFICA 12. CONCENTRACION VS EFICIENCIA



la eficiencia.

f) Las relaciones obtenidas para el costo y pérdida de color muestran que éstas son asintóticas respecto al eje de las abscisas (concentración). Esto quiere decir que por más alta que sea la concentración, el costo y la pérdida de color no podrán tomar un valor de 0, y los beneficios cada vez serán menores, viéndose más favorecida la producción.

Con las ecuaciones matemáticas obtenidas se extrapoló hasta una concentración del 40 % para ver la influencia que tendría sobre la pérdida de color, costo y producción. Los resultados son:

CONCENTRACION (%)	PERDIDA COLOR (%)	COSTO (\$/GR)	PRODUCCION (GR/HR)
1	11.70	21.08	76.85
10	9.09	2.48	652.50
20	8.60	1.39	1165.00
40*	7.91	0.72	2372.20

* DATOS EXTRAPOLADOS

De mantenerse la tendencia de las ecuaciones, un incremento en la concentración hasta el 40% reduce la pérdida de color, pero esta se hace menos importante comparada con los beneficios obtenidos en costo y producción. El costo disminuye de 21 pesos a solo 72 centavos (30 veces) cuando la concentración pasa del 1 al 40%, y la producción aumenta en igual proporción.

Por lo anterior, aunque los polvos obtenidos al 1% no presentan atterramiento o caramelización, su costo es elevado, además de

que se pierde 30% de los polvos por arrastre del ciclón. Concentraciones del 10% tienen un costo 10 veces menor comparado con el 1%, pero el incremento en la concentración puede reducirlo aun mas (3.5 veces). Esto se debe hacer, ya que las densidades de los polvos obtenidos siguen siendo altas (0.64 a 0.70 gr/cm³). Es necesario lograr densidades de 0.52 a 0.58 gr/cm³, correspondientes a los polvos comerciales para obtener un producto de mejor calidad y de más fácil reconstitución.

VI. CONCLUSIONES

1) En el uso de colorantes el fabricante necesita no sólo un aspecto adecuado, sino una cierta estabilidad bajo las diferentes condiciones de producción y almacenamiento. Las betalaínas presentan la desventaja de su inestabilidad, por lo que se requieren estudios adicionales sobre aplicación y tiempos de vida útil en su empleo en alimentos para hacer posible su producción a nivel industrial.

2) En el secado no solo se debe buscar obtener un producto estable, sino que sea poco 'polvoso', tenga facilidad de flujo y sea de fácil reconstitución. Esto es parte del control de calidad y contribuye a la apariencia del producto en el mercado. El éxito o fracaso de un producto dependerá de la medida en la que cumpla con el mayor número de atributos de calidad así como su precio final, que en el caso de los polvos obtenidos en las corridas con acetato la calidad y costo están fuera de especificaciones.

3) No es económicamente factible el secado de betalaínas con la tecnología establecida. Tomando en cuenta que un kilogramo de color rojo sintético cuesta 17500 pesos en el mercado y lo comparamos con los 26 200 pesos de costo energético sólo de secado en el mejor de los casos, se puede predecir un precio poco competitivo para el producto en el mercado.

4) Es necesario cambiar el acetato de amonio como eluyente, ya que tiene las desventajas:

a) alta temperatura de ebullición, que obliga a usar temperaturas de secado más elevadas.

b) se utilizan volúmenes muy grandes de eluyente (entre 5 y 10 litros por gramo de color) y no se recupera en la evaporación.

c) da lugar al sobrecalentamiento de la partícula, afectando las propiedades finales del producto obtenido.

d) es muy corrosivo

e) presenta reacción química a temperatura de ebullición.

5) En el secado puede resultar mas fácil cambiar de solvente a recurrir en gastos excesivos para recuperarlo.

6) Al cambiar el eluyente deben tomarse en cuenta los criterios:

a) tener la menor temperatura de ebullición posible

b) solventes diferentes al agua requieren la elaboración de una carta psicrométrica por separado

c) tener el menor calor latente, que repercute en un mejor aprovechamiento del calor, reduciendo el tamaño del equipo requerido o aumentando la capacidad del ya instalado.

7) En el secado el costo principal es la energía empleada. Dicho costo es proporcional al agua a evaporar, por lo que soluciones de baja concentración no sólo son caras, sino que incrementan el el costo de recuperación de polvos por la necesidad de instalar filtros bolsa para recuperar los finos.

8) Secar soluciones de baja concentración es muy caro, y se realizará solo cuando el producto sea rentable. En general se puede decir que soluciones con concentraciones menores al 10% requieran de estudios adicionales para incrementarla.

9) Buscar la mayor concentración de sólidos en la alimentación debe ser uno de los objetivos principales en un estudio de secado. No solo tiene un efecto protector sobre el producto, sino que aumenta la producción, reduce el costo final del producto y disminuye el gasto de aire de secado, que son ventajas económicas muy importantes.

10) La adherencia de los polvos en ductos no solo afecta a la calidad del producto sino a la operación del equipo. Prácticamente no se podían secar dos lotes seguidos debido al taponamiento de los ductos, volviendo al secado una operación batch.

11) La eficiencia de la operación se favorece con el incremento en la temperatura del aire de secado y la reducción de la temperatura de salida, siendo esta última la que ejerce una mayor influencia.

12) para complementar el presente trabajo se recomienda:

a) estudiar otros eluyentes para la columna

b) aumentar la concentración

c) buscar la mayor temperatura de entrada así como la menor de salida

d) optimizar el gasto de aire, evitando el derroche de energía calentando gas cuyo calor no va a ser aprovechado. Esto se logrará cerrando el papalote.

13) Se debe aumentar la velocidad de giro del disco atomizador cuando la concentración de la solución sea muy alta, se busque incrementar la producción y el producto permanezca dentro de las

normas de calidad establecidas. En este caso es necesario hacer un balance entre el incremento de energía de atomización, el aumento en la producción y las características del producto para ver si es o no conveniente incrementarlas.

14) Se podría probar otro tipo de arreglo en el secador, ya sea en contracorriente o flujo mixto. En este caso sería necesario incrementar la concentración y emplear temperaturas más bajas, ya que en este tipo de arreglos hay más riesgo de sobrecalentamiento, pero tienen la ventaja de ser más eficientes y de dar productos con menores densidades. Esto se hará siempre y cuando se tengan los aditamentos para hacer las modificaciones al equipo.

VII NOMENCLATURA

A _w	actividad de agua
C	concentración del componente en estudio (mol/Lt)
C ₀	concentración inicial del componente en estudio (mol/Lt)
D _r	radio del disco atomizador (in)
E _a	Energía de activación (Kcal/mol K)
E _g	eficiencia global
K	constante de reacción (min ⁻¹)
K ₀	factor preexponencial de la ecuación Arrhenius
m	pendiente de una línea recta
N	velocidad de giro del disco atomizador (RPM)
P	producción (gr/Hr)
pH	medida de acidez o alcalinidad de una sustancia
Ph	potencia neta para atomizar (HP)
pt	presión atmosférica (atm)
pK _a	constante de disociación de un ácido
Q	gasto de alimentación (lts/Hr)
r	coeficiente de correlación
R	constante general de los gases (1.98 cal/mol K)
RPM	revoluciones por minuto del disco atomizador
s	orden de reacción
t	tiempo (minutos)
t(1/2)	tiempo de vida media (minutos)
T	temperatura (C)
T _a	temperatura del aire ambiente (C)
T _{as}	temperatura del aire de secado (C)
T _s	temperatura del aire de salida del secador (C)
V _h	volumen húmedo (m ³ / Kg)
w	gasto de alimentación (lb/min)
Y	humedad del aire (lb de agua/ lb aire seco)
[]	concentración (% porciento en peso)

VIII BIBLIOGRAFIA

- 1) ADLER C.R Y MARSHALL. PERFORMANCE OF SPINNING DISK ATOMIZER. C.E.P. VOL.47 NO. 10 PP. 515
- 2) ATTOE E.L., VON ELBE J.H. PHOTOCHEMICAL DEGRADATION OF BETANINE AND SELECTED ANTHOCYANINE, 1981. J.FOOD SCIENCE, VOL. 46, PP. 1934
- 3) ATTOE E.L., VON ELBE J.H. OXYGEN INVOLVEMENT IN BETANINE DEGRADATION; EFFECT OF ANTIOXIDANTS. 1985. J. FOOD SCIENCE VOL.50, PP. 106
- 4) BALTAS L.,GAUVIN W.H. PERFORMANCE PREDICTIONS FOR A COCURENT SPRAY DRYER. 1969. AICHE JOURNAL. VOL.15 NO. 5 PP.764
- 5) BALTAS L.,GAUVIN W.H. TRANSPORT CHARACTERISTICS OF A COCURENT SPRAY DRYER. 1969. AICHE JOURNAL. VOL.15 NO.5 PP.773
- 6) HELCHER D.W. SMITH D.A. DESIGN AND USE OF SPRAY DRYERS. 1963. CHEMICAL ENGINEERING, NO. 9 PP. 83
- 7) BOTMA Y. FOOD COLOR CONTROL IN 21 NATIONS. 1974. FOOD ENGINEERING, NO. 5 PP. 81
- 8) COHEN E. AND SAGUY I. EFFECT OF WATER ACTIVITY AND MOISTURE CONTENT ON THE STABILITY OF BEET POWDER PIGMENTS.1983. J.FOOD SCIENCE VOL.48 PP.703
- 9) COOK E.M. ESTIMATING SPRAY DRYING COSTS.1966.CHEM.ENG.PROGRESS VOL.62 No.6 PP.93
- 10) BITTMAN FIX. HOW TO CLASSIFY A DRYING PROCESS. 1977. CHEMICAL ENGINEERING No.1 PP. 106
- 11) DLOUHY J. GAUVIN W.H. HEAT AND MASS TRANSFER IN SPRAY DRYING 1960. AICHE JOURNAL. VOL. 6 NO. 1 PP. 29
- 12) DOWNTON GALEN, FLORES LUMA. MECHANISM OF STICKNESS IN HYGROSCOPIC AMORPHOUS POWDERS. 1982. IND. ENG. CHEM. FUND. VOL. 21 PP. 447
- 13) FRIEDMAN, GLUCKERT, MARSHALL. CENTRIFUGAL DISK ATOMIZATION. ATOMIZATION.1952. C.E.P. VOL. 48 NO. 4 PP. 181
- 14) GARCIA HERNANDEZ FERNANDO, VILLEGAS RAMIREZ ET. AL., ESTUDIO DE LOS COLDRANTES DEL BETABEL. 1983. REV. SOC. QUT. MEX. VOL. 27 NO. 4 PP. 175
- 15) GLUCKERT F.A. A THEORETICAL CORRELATION OF SPRAY DRYER PERFORMANCE.1962. AICHE JOURNAL, VOL.8 NO.4. PP. 460
- 16) HUANG A.S., VON ELBE J.H. KINETICS OF THE DEGRADATION AND REGENERATION OF BETANINE. 1985. J.FOOD SCIENCE. VOL. 50 PP.115
- 17) HUANG A.S., VON ELBE. EFFECT OF PH ON DEGRADATION AND REGENERATION OF BETANINE. 1987. J. FOOD SCIENCE , VOL. 52 PP.1689
- 18) INSTITUTE OF FOOD TECHNOLOGISTS, FOOD COLORS. 1986. FOOD TECHNOLOGY, NO. 7 PP, 49
- 19) KATTAS, GAUVIN W. SOME FUNDAMENTAL ASPECTS OF SPRAY DRYING. 1975. AICHE JOURNAL. VOL.21 NO.1. PP. 143
- 20) LEE D.A. CLASSIFYING AND SELECTING SPRAY DRYERS.1981. C.E.P. No.3 PP.34
- 21) LEE. D.A. FIVE STEPS SIMPLIFY SELECTING A DRYER. 1974. FOOD ENGINEERING, NO. 11 PP. 81
- 22) LEE Y.N. , WILEY. METALINE YIELD FROM A CONTINUOUS SOLID LIQUID EXTRACTION SYSTEM AS INFLUENCED BY RAW PRODUCT, POST HARVEST AND PROCESSING VARIABLES. 1981. J. FOOD SCIENCE. VOL. 46. PP. 421

- 23) MACKAY LAIN. WHITER SPRAY DRYING.1985. THE CHEM. ENG. No.4 PP.19
- 24) MAIN J.H.,CLIDESDALE F.M., FRANCIS. SPRAY DRYING ANTHOCYANINE CONCENTRATES FOR USE AS FOOD COLORS.1978. J.FOOD SCIENCE. VOL. 43 PP.1693
- 25) MARVY T.J., TAYLOR A. TURNER R. THE BETACYANINE AND THEIR DISTRIBUTION 1963.PHYTOCHEMISTRY. VOL. 2. PP. 65
- 26) MARSHALL J.R. SELTZER E. PRINCIPLES OF SPRAY DRYING. 1950. C.E.P. VOL. 46 NO. 10. PP. 501
- 27) MEYER F.W. FACTORS AFFECTING PARTICLE SIZE IN A SEVEN FOOT SPRAY DRYER. 1955. C.E.P. VOL. 51. NO. 11. PP. 538
- 28) MOREYRA R. PELEG M. COMPRESSIVE DEFORMATION PATTERNS OF SELECT FOOD POWDERS. 1980. J. FOOD SCIENCE VOL. 45. PP. 885
- 29) PASCH J.H, VON ELBE J.H.BETALAINS AS NATURAL FOOD COLORANTS. 1975. FOOD PROD. DEV. NO.12 VOL.38
- 30) PASCH J.H., VON ELBE J.H. METALAINS AS COLORANTS IN DAIRY PRODUCTS.1975.J. MILK FOOD TECH. VOL.38 NO.1 PP.22
- 31) PASCH J.H., VON ELBE J.H. BETANINE DEGRADATION AS INFLUENCED BY WATER ACTIVITY.1975. J. FOOD SCIENCE VOL.40 PP.1145
- 32) PELEG M. MOREYRA R.AND SEOVILLE E. RHEOLOGICAL CHARACTERIS- OF FOOD POWDERS.1982. AICHE SYMPOSIUM SERIES. VOL.78 NO.218 PP.138
- 33) PISEKLY J. BULK DENSITY OF MILK POWDERS. 1978. DAIRY IND.INT. VOL.43 No.42
- 34) RANZ W.E. AND MARSHALL. EVAPORATION FROM DROPS.1952. C.E.P. VOL.48 NO.3 PP. 141
- 35) RYOSO TUEI, TAKESHI FURUTA. DRYING OF A DROPLET IN A NON SUPPORTED STATE. 1982. AICHE SYMPOSIUM SERIES.NO.218 VOL.78 PP.41
- 36) SAGUY J. THERMOSTABILITY OF RED BEET PIGMENTS; INFLUENCE OF PH AND TEMPERATURE.1979. J.FOOD SCIENCE. VOL.44 PP.1554
- 37) SAPIKIE ET AL. DRYING IN THE FOOD INDUSTRY.1979. C.E.P. NO.4 PP.44
- 38) SHITH .C, WILEY R.C. BETACYANINE AND BETA XANTHINE DECOLORIZING ENZYMES IN THE BEET. 1980. J.FOOD SCIENCE VOL.47 PP.164
- 39) SINGER J.W AND VON ELBE. DEGRADATION RATES OF VULGAXANTINE 1.1980.J.FOOD SCIENE. VOL.45 PP.489
- 40) THOKIEKUSCH AND KING C.J. VOLATILE LOSS DURING ATOMIZATION IN SPRAY DRYING.1980. AICHE JOURNAL. VOL.26 NO. 5 PP.718
- 41) VON ELBE J.H, HUANG Y. RETALAINS AS POSSIBLE FOOD COLORANTS OF MEAT SUBSTITUTES. 1973. CEREAL SCIENCE TODAY. VOL.18 NO.9 PP.263
- 42) VON ELBE J.H. LOSS AND REGENERATION OF BETACYANTINE PIGMENTS DURING PROCESSING OF RED BEETS.1981.J. FOOD SCIENCE . VOL.46 PP.1713
- 43) VON ELBE J.H.,YOUNG J.COLOR STABILITY OF BETANIN.1974. J.FOOD SCIENCE.VOL.39 PP.334
- 44) WILEY R. C. , YA NIEN LEE. RECOVERY OF METALAINES FROM RED BEETS BY A DIFFUSION EXTRACTION PROCEDURE.1971.J.FOOD SCIENCE VOL. 43 PP.1056
- 45) BIOCHEMICAL AND BIOLOGICAL ENGINEERING SCIENCE
BLACKENBROUGH N.
ACADEMIC PRESS. LONDON N. Y. 1968

- 46) BIESTADISTICA
DANIEL WAYNE W.
LITHUSA, MEXICO 1977
- 47) ELEMENTOS DE CINETICA DE REACCIONES
LATHMAN-BORGESS
ED. MANUAL MODERNO, MEXICO 1980
- 48) ELEMENTS OF FOOD ENGINEERING
HARPER, JOHN C.
AVI PUBLISHING CO, WESPORT, CONNECTICUT 1976 U.S.A
- 49) ESTADISTICA PARA INGENIEROS
WALPOLE Y MYERS
ED. INTERAMERICANA, MEXICO 1986 3a. EDICION
- 50) FOOD PROCESS ENGINEERING
HELDMAN AND SINGH
AVI PUB.CO, WESPORT, CONNECTICUT 1981, U.S.A 2a ED.
- 51) INDEX MERCK
MERCK AND CO. INC.
RAHWAY, N.J. U.S.A. 1976
- 52) INTERNATIONAL CRITICAL TABLES
MC. GRAW HILL
NEW YORK, LONDON 1929
- 53) INTRODUCCION A LA INGENIERIA QUIMICA
BADGER Y RANCHERO
MC. GRAW HILL, MEXICO 1985
- 54) INTRODUCCION A LA CIENCIA DE LOS ALIMENTOS
FENNEMA OWEN
ED. REVERTE, ESPANA 1982
- 55) MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO
PERRY Y CHILTON
MC.GRAW HILL, 1982. BOGOTA, COLOMBIA 2a ED.
- 56) METODOS ESTADISTICOS APLICADOS
DOWNIE H.
ED. HARLA, MEXICO 1973
- 57) OSCURECIMIENTO EN ALIMENTOS
SANTOS MORENO ARMANDO
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHAPINGO, DEPTO. IND. AGRICOLAS,
MEXICO 1982
- 58) PRINCIPIO DE OPERACIONES UNITARIAS
FOUST AN WENZEL
C.E.C.S.A., MEXICO 1983
- 59) QUIMICA ORGANICA
STREKWIJESER, HEATHCOCK
ED. INTERAMERICANA, MEXICO 1981
- 60) PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCION DE PIGMENTOS DE ORIGEN
NATURAL DE LA SERIE BETANINA Y BETAXANTINA A PARTIR DE
BETABEL (BETA VULGARIS)
SANTUS ELVIRA, GARCIA H. FERNANDO, LOURIVAL POSSANI
PATENTE DE INVENCION NUMERO 156565