

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA

- 40 -

posición (% de reprocesos y finos). Estos factores alteran la viscosidad y la tensión superficial del extracto, e inciden en su comportamiento durante el proceso.

- Temperatura de operación de la espumadora: afecta la viscosidad y la tensión superficial del extracto.
- Velocidad del agitador (Dasher), que altera el tamaño de las burbujas.
- Temperatura de envío, sobretodo si esta varía en el tiempo, haciendo inestable la operación de la espumadora.
- Presión de envío, que puede variar con el grado de llenado de los tanques y alterar la presión de espumación.
- Presión y tipo de gas espumante.

La influencia exacta de algunos de estos factores es está siendo estudiada actualmente en el LIQC.

En particular, se ha observado mediante mediciones efectuadas en la Fábrica, que la temperatura de espumación afecta el color del extracto espumado y el del producto terminado.

Este hecho está probablemente asociado con las variaciones del tamaño de las burbujas como lo vimos en el párrafo anterior.

4.- L i o f i l i z a c i ó n .-

La liofilización es el método más apropiado para el secado de productos sensibles al calor y ricos en - sustancias volátiles, tales como el café u otros - productos alimenticios. Durante la liofilización, el

agua es retirada en forma de vapor directamente a partir del producto congelado.

Debido a que la operación se efectúa a baja temperatura, se evita cualquier tipo de deterioro térmico al producto. Adicionalmente, por razones que veremos más adelante, la liofilización permite una alta retención de volátiles, siempre y cuando se opere en condiciones adecuadas.

La liofilización propiamente dicha requiere la congelación previa del producto. Este proceso obedece a los principios estudiados en detalle en el capítulo 2. En lo que sigue nos limitaremos por lo tanto a discutir algunos aspectos específicos de la congelación de extractos de café, para pasar luego a discutir los mecanismos de la liofilización con énfasis particular en las teorías que explican la retención de aromas.

4.1. Congelación de extractos espumados .-

Como lo vimos en el capítulo 2, al congelar una solución, se produce una separación parcial del agua, que cristaliza formando cristales de hielo puro.- El agua restante queda ocluida dentro del sólido eutéctico y no cristaliza. En el caso particular de los extractos de café, la temperatura eutéctica es aproximadamente de -25°C , y la concentración del sólido es del orden de 65% en peso.

Si la solución ha sido previamente espumada, la congelación tiene lugar únicamente en el líquido entre las burbujas. El tamaño de éstas, lo mismo que el espesor de las paredes que las separan influye en los procesos de nucleación y crecimiento de los cristales de hielo y limita el tamaño máximo que éstos pueden alcanzar. Así por ejemplo, si las burbujas son pequeñas y numerosas, las paredes que las separan serán delgadas (ver capítulo 3) y los cristales resultantes serán pequeños. Las burbujas grandes, por

el contrario, facilitan la formación de cristales grandes. La espumación influye también en el calor específico y en la conductibilidad térmica del producto, parámetros ambos que juegan un papel esencial en el desenvolvimiento del proceso de congelación.

Además de la espumación, otros factores influyen en dicho proceso. Entre los principales podemos mencionar los siguientes:

- Las características del extracto y especialmente su viscosidad y su tensión superficial que afectan la nucleación y el crecimiento de los cristales.
- La velocidad y temperatura de las bandas, que influyen en la rata de congelación y por lo tanto en el tamaño de los cristales de hielo.
- El espesor del pastel, que junto con lo anterior, influye en la rata de congelación.

El espesor de las paredes entre las burbujas y el tamaño de los cristales de hielo, lo mismo que la temperatura final del proceso, determinan las propiedades mecánicas del producto congelado y por ende su comportamiento durante la granulación. De una manera general se ha observado que la dureza del producto aumenta al disminuir la temperatura por debajo de la eutéctica, a pesar de que la formación y el crecimiento de los cristales ya no es posible. Ese aumento de la dureza, a pesar de que facilita la granulación, puede causar un aumento de la producción de finos. Las propiedades mecánicas del congelado serán discutidas más en detalle en un trabajo posterior.

4.2. L i o f i l i z a c i ó n . -

La liofilización consta de dos procesos que tienen

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA

- 43 -

Lugar simultáneamente: la sublimación directa de los cristales de hielo, y el retiro del agua aprisionada en el sólido eutéctico, que se efectúa por difusión de las moléculas de agua hasta los poros dejados por los cristales de hielo al sublimarse.

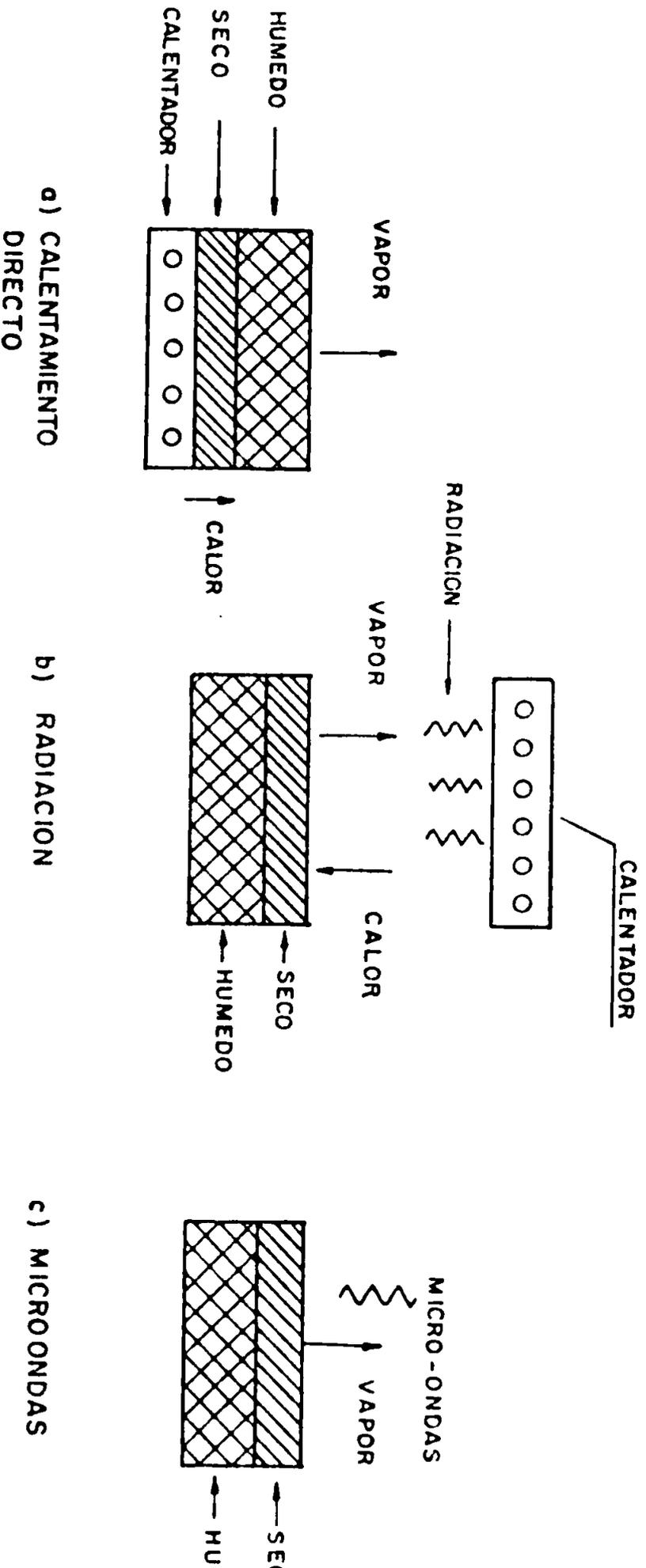
Ambos procesos requieren el suministro de una cierta cantidad de calor: el calor de sublimación y el de desorción que puede ser superior al primero.

Para que el proceso sea posible, la presión parcial de vapor de agua en la superficie del producto debe ser inferior a la presión de vapor del hielo a la temperatura de operación (ver figura 2).

La liofilización puede en principio llevarse a cabo a presión atmosférica, utilizando como medio de arrastre del vapor, aire frío muy seco (de manera que la presión parcial de vapor de agua sea lo suficientemente baja). Este método presenta varios inconvenientes que hacen difícil su aplicación industrial. En la actualidad se prefiere efectuar la operación en vacío, a una presión total inferior a 1 mm Hg.

La temperatura de operación debe mantenerse por debajo de la temperatura eutéctica, con el fin de evitar la fusión total o parcial del producto.

El calor de sublimación puede ser suministrado al producto de tres maneras diferentes como lo muestra la figura 25 : a) Por conducción, utilizando placas de calentamiento en contacto directo con la bandeja que contiene el producto. Este sistema se emplea, por ejemplo, en el túnel de Leybold. b) Por radiación, mediante placas de calentamiento (en general 2), situadas a cierta distancia de la bandeja de producto. Este método utiliza en las cámaras Stokes, por ejemplo. c) Por micro-ondas. A pesar de que, en principio, mediante este



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

FIGURA 25

sistema se pueden evitar los problemas de transferencia de calor a través de la capa seca, los riesgos de fusión del producto y de descargas en el gas, han impedido hasta la fecha su aplicación a escala industrial.

La figura 26 muestra esquemáticamente un equipo de liofilización, que consta esencialmente de una cámara de vacío hermética, del sistema de suministro de calor al producto y de los equipos necesarios para mantener la presión requerida en la cámara. El sistema de vacío comprende una bomba de prevacío para la evacuación inicial de la cámara y el retiro de los gases no condensables presentes en el producto y un condensador refrigerado para la desublimación del vapor de agua. El uso de un condensador es indispensable dado el gran volumen ocupado por el vapor que se genera durante el proceso, que no podría ser manejado por ningún tipo de bomba de vacío mecánica. El condensador debe tener una temperatura tal que la presión de vapor del hielo a esa temperatura, sea inferior a la presión que se quiere mantener dentro de la cámara. El calor de desublimación del vapor debe ser absorbido totalmente por el sistema de refrigeración, razón por la cual los costos en energía de la liofilización son relativamente elevados.

4.2.1. Liofilización de una capa congelada.-

La figura 27 muestra esquemáticamente la liofilización de una capa de producto congelado en el caso en que el calor es suministrado por radiación desde la parte superior. Para el estudio del fenómeno es necesario considerar dos procesos simultáneos: transferencia de calor a través de la capa seca para suministrar el calor latente al frente de sublimación y transferencia de materia desde dicha fuente hasta la superficie del producto. Ambos procesos están regidos por las ecuaciones de difu

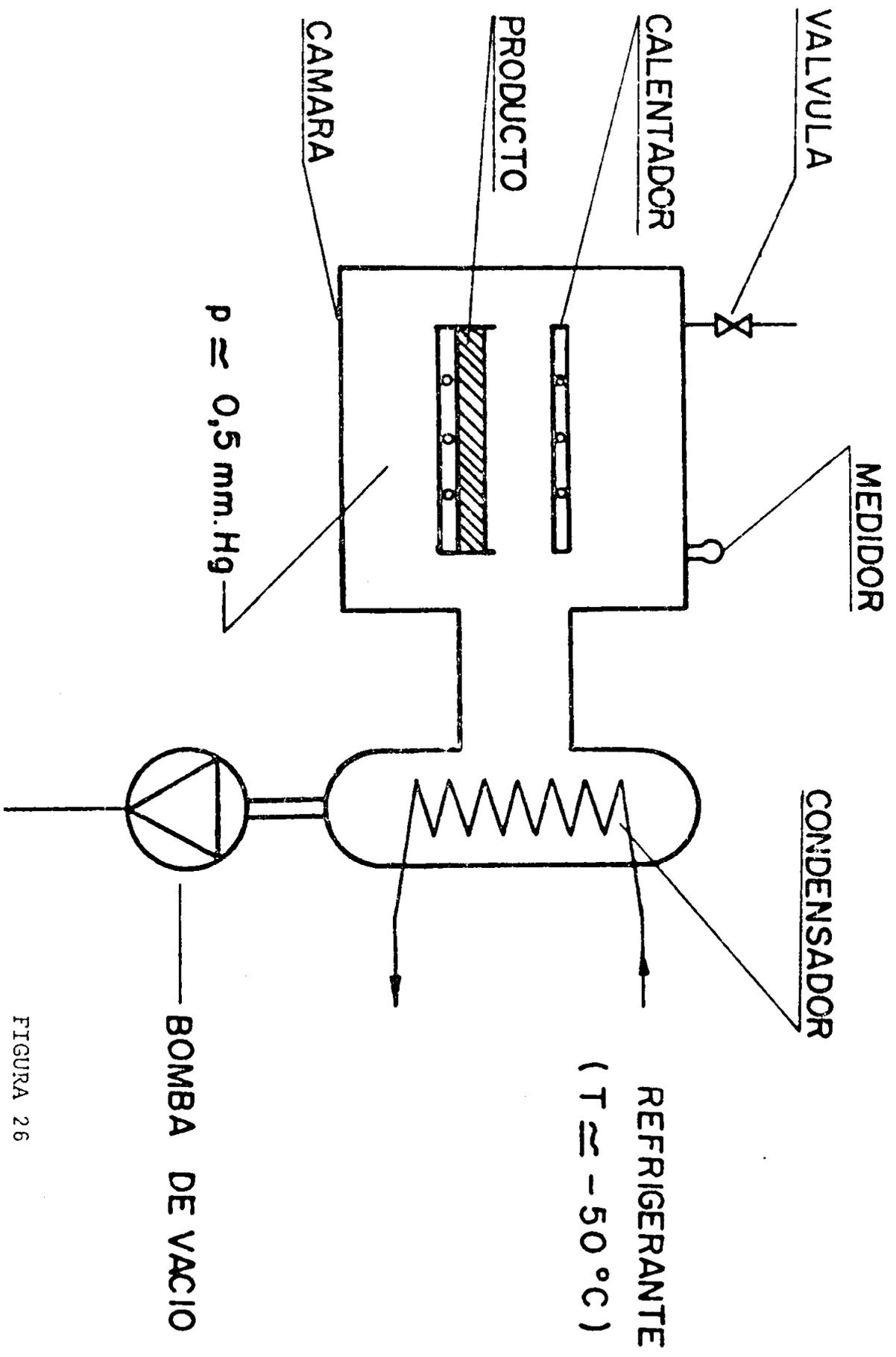
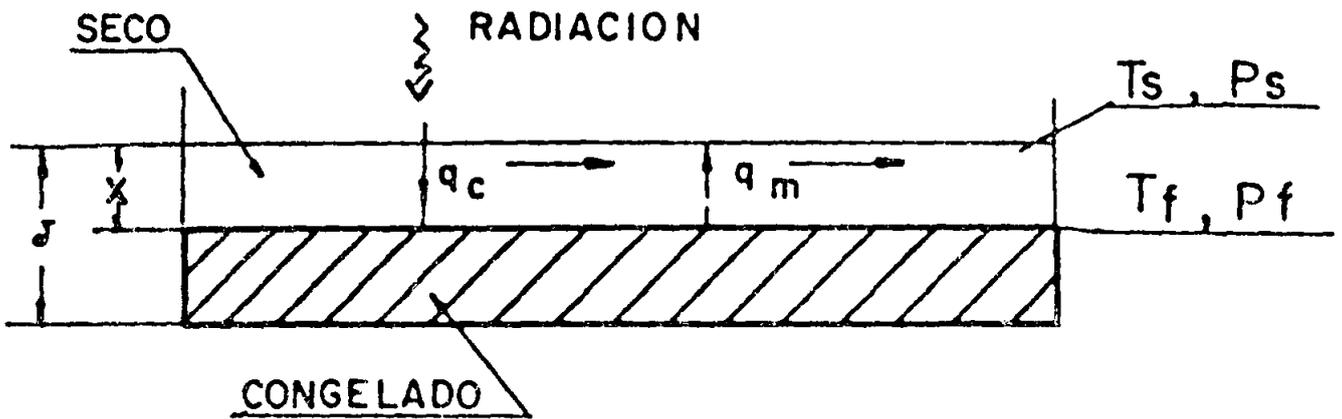


FIGURA 26

MECANISMOS



FEDERACION NACIONAL DE
CAFETEROS DE COLOMBIA

- 45 -

sión vistas en el capítulo 1, que deben resolverse simultáneamente, teniendo como condición de frontera común que la presión en el frente de sublimación es igual a la presión de vapor del hielo a la temperatura de dicho frente.

La solución exacta de este problema es muy compleja debido a la no linealidad de la condición de frontera. En el caso de la liofilización y debido a lo lento del proceso, es posible obtener una solución aproximada satisfactoria suponiendo que la presión y la temperatura varían linealmente a lo largo de la capa seca. Este modelo es el que se denomina usualmente URIF (uniform retreating ice front).

Si J_q es la cantidad de calor transferida por unidad de área y de tiempo y J_m la cantidad de materia correspondiente, podemos escribir:

$$J_q = K \frac{T_s - T_m}{X}$$

(36)

$$J_m = D \cdot \frac{P_s - P_f}{X}$$

donde P_f y T_f y P_s y T_s son las presiones y temperaturas respectivas del frente de sublimación y de la superficie del producto, X es el espesor de la capa seca, K su conductibilidad térmica y D su coeficiente de difusión.

El calor transportado debe suministrar el calor necesario para la sublimación del hielo, es decir que

$$J_c = L \rho \frac{dx}{dt} = L J_m \quad (37)$$

donde L es el calor latente de sublimación por unidad de masa, ρ el peso específico y dx/dt la velocidad de la frontera.

Utilizando las ecuaciones (36) y (37) podemos calcular el tiempo total t necesario para la liofilización completa de la capa de espesor δ :

$$t = \frac{1 \rho d^2}{2 K (T_s - T_f)} = \frac{\rho \delta^2}{2 D (P_f - P_s)} \quad (38)$$

Es interesante observar que el tiempo depende del cuadrado del espesor y es inversamente proporcional a la conductibilidad térmica o al coeficiente de difusión. Por otra parte P_f y T_f están ligados por la relación

$$P_f = P_v (T_f)$$

siendo P_v

la presión de vapor del hielo a la temperatura del frente de secado.

4.2.2. Liofilización de una partícula.-

La discusión anterior se refiere a una placa uniforme congelada. En el caso de la Fábrica se trata de una capa de partículas más o menos compacta. Como base para el estudio de ese caso debemos estudiar primero la liofilización de una partícula aislada, que supondremos esférica para simplificar.

La configuración obtenida un tiempo t después de iniciada la liofilización aparece en la figura 28. Supondremos que el núcleo de producto por liofilizar conserva igualmente la forma esférica durante el proceso. Con la hipótesis de cuasi-estacionariedad, las ecuaciones que gobiernan la temperatura, T , y la presión, p , se escriben:

$$\frac{d^2 T}{d r^2} = 0$$

$$\frac{d^2 p}{d r^2} = 0$$

(39)

Estas ecuaciones se integran inmediatamente y dan las distribuciones de presión y temperatura. En coordenadas esféricas las soluciones se escriben:

$$T(r) = T_s + \frac{T_s - T_f}{d_o - d_f} \left(d_f - \frac{d_o d_f}{2r} \right)$$

$$p(r) = p_s + \frac{p_s - p_f}{d_o - d_f} \left(d_f - \frac{d_o d_f}{2r} \right)$$

(40)

Siendo d_f , p_f y T_f el diámetro, la presión y la temperatura del núcleo y d_o , p_s y T_s las magnitudes correspondientes para la superficie, y r la distancia al centro.

Las corrientes de calor J_c y de materia J_m se deducen de estas dos expresiones:

$$J_c = k \frac{T_s - T_f}{d_o - d_f} \frac{d_o d_f}{2 r^2}$$

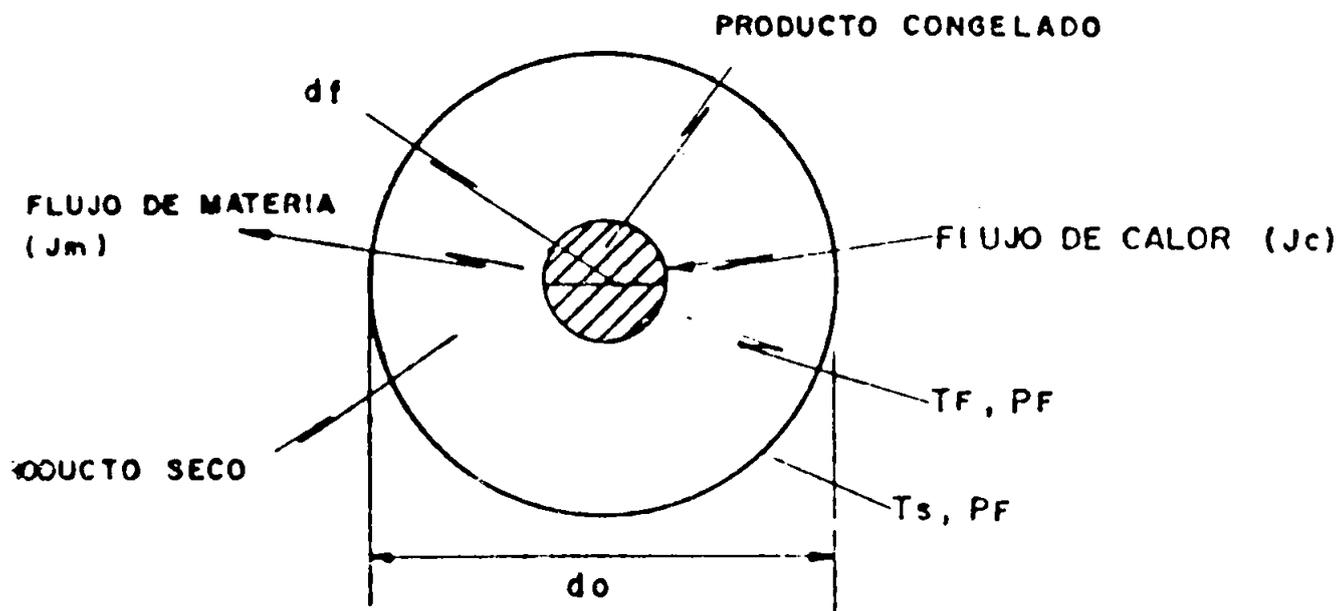


FIGURA 28

$$J_m = D \frac{P_F - P_S}{d_o - d_f} \frac{d_o d_f}{2r^2}$$

K es la conductibilidad térmica del producto seco y D su conductibilidad másica.

La cantidad de calor y de materia totales transferidas por unidad de tiempo se escriben:

$$\dot{Q}_c = 2\pi \frac{d_o d_f}{d_o - d_f} K (T_s - T_F)$$

(42)

$$\dot{Q}_m = 2\pi \frac{d_o d_f}{d_o - d_f} D (P_F - P_S)$$

En condiciones cuasi-estacionarias, el calor transferido suministra exactamente el calor latente de sublimación, es decir:

$$\dot{Q}_c = L \dot{Q}_m \quad (43)$$

siendo L el calor latente de sublimación por unidad de masa. Con ayuda de (42) y (43) obtenemos entonces la relación entre la temperatura y la presión del frente de sublimación.

$$P_F = P_S + \frac{K}{LD} T_s - \frac{K}{LD} T_F \quad (44)$$

La presión y la temperatura del frente de secado - deben satisfacer simultáneamente (44) y la relación ter

modinámica entre la presión de vapor del hielo y su temperatura. El punto de trabajo del sistema - está situado en la intersección de la recta con - la curva $P = f(T)$, como lo muestra la figura 29 . De esta gráfica podemos sacar las deducciones siguientes:

- 1) - La posición del punto de trabajo es función de la temperatura y la presión en la superficie. Un aumento de uno u otro de esos parámetros - provoca un incremento de la temperatura del frente de secado, que puede conducir a la fusión total o parcial del producto.
- 2) - Si la presión y la temperatura superficiales son mantenidas constantes, la temperatura del frente de secado se mantiene constante durante todo el proceso de sublimación.
- 3) - La pendiente de la recta depende de la razón K/D , la cual, a su vez, es función de la estructura del producto y por lo tanto de la espumación y de la congelación. Conociendo K y D es en principio posible calcular la presión y temperatura que producen una ratamáxima de liofilización, compatible con la temperatura de fusión del producto. Es necesario tener en cuenta que, tanto K como D , son función de la presión, especialmente en los rangos de presión utilizados para la liofilización.

La figura 30 muestra la variación de la conductividad térmica de la capa liofilizada en función de la presión para el caso de la pera. A una presión suficientemente baja, la conductibilidad es constante e igual a la conductibilidad intrínseca del producto. En el rango en que se trabaja en la fábrica (alrededor de 0.5 mm Hg) se observa una variación marcada de ese parámetro. También se observa una influencia considerable del tipo de gas residual. La conductibilidad es tanto más alta -

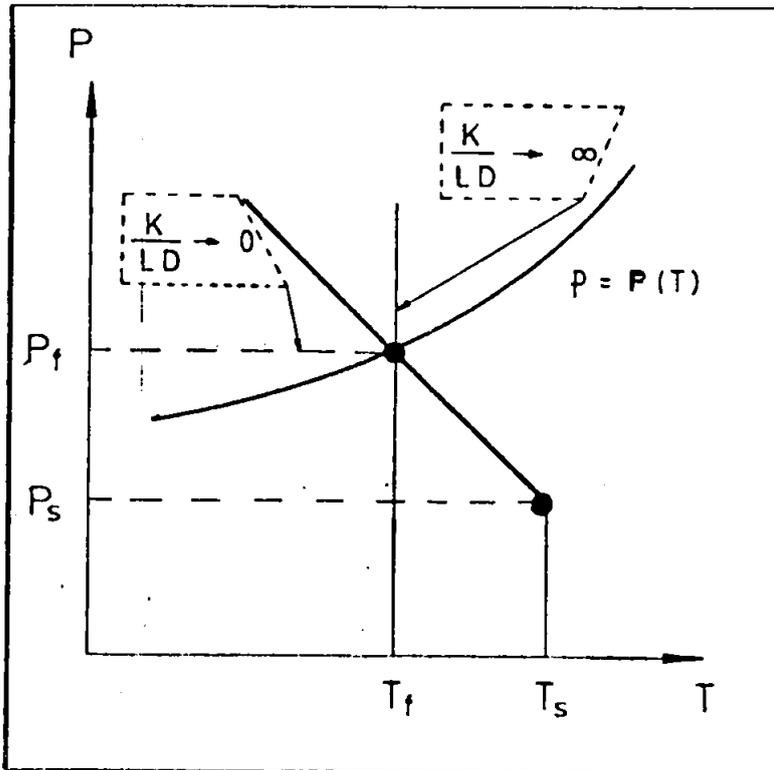


FIGURA 29

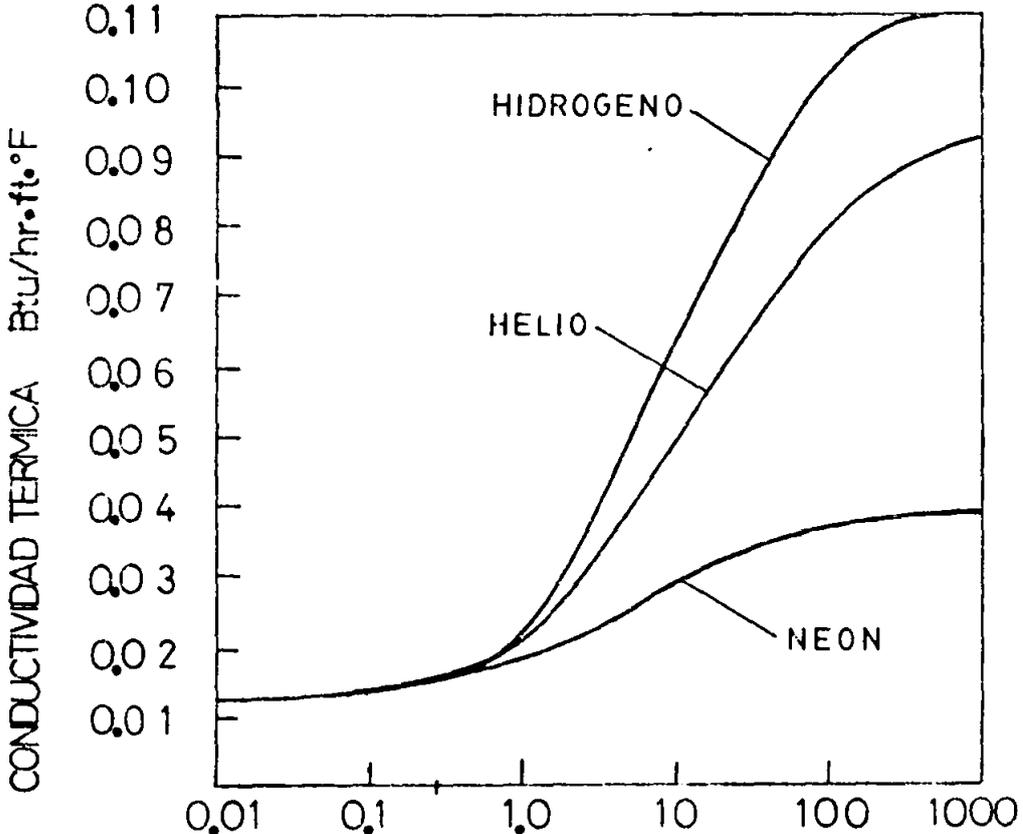
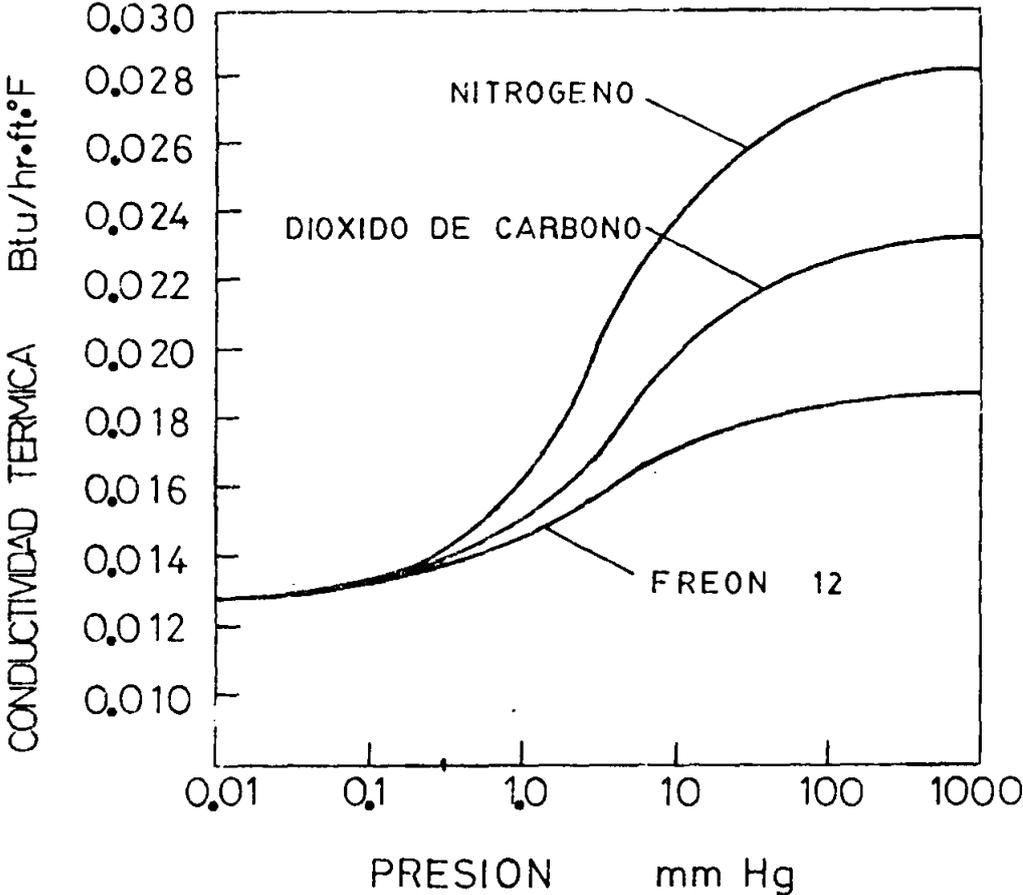


FIGURA 30

cuanto la masa molecular del gas es pequeña.

La presión afecta también el coeficiente de difusión, como lo muestra la figura 31 . Al incrementarse la presión, el coeficiente de difusión disminuye (su inversa aumenta).

Una variación de la presión en la cámara afecta la liofilización de varias maneras simultáneamente. Por una parte, la presión en la superficie varía lo cual altera el punto de trabajo de la curva (Fig.29)Adicionalmente, K y D varían en sentidos opuestos y por lo tanto se modifica la pendiente K/D de la recta de la figura. Así, por ejemplo, un aumento de la presión se traduce en un incremento de la temperatura del frente de secado y puede llevar a una fusión total o parcial del producto.

La velocidad de congelación afecta la porosidad del producto y por lo tanto el coeficiente de difusión, como lo muestra la figura 32 . Una congelación lenta produce una estructura más porosa y favorece la liofilización.

Suponiendo que la zona de transición entre el núcleo congelado y la parte ya seca es muy estrecha, es decir, que la humedad varía bruscamente de su valor inicial a su valor final en el frente de secado (esto equivale a desprestigiar el proceso de desorción.) podemos calcular el tiempo de secado de la partícula. Utilizando

$$\dot{Q}_m = -\frac{dm}{dt} = \frac{2\pi d_o d_f}{d_o - d_f} D (p_f - p_s) = -\frac{d}{dt} \left(\frac{\gamma \pi}{6} d_f^3 \right)$$

donde γ es la masa de hielo presente en el núcleo por unidad de volumen.

Por integración obtenemos el tiempo total t :

$$t = \frac{\gamma d_o^2}{24 D (p_f - p_s)} = \frac{\gamma L d_o^2}{24 K (T_s - T_f)} \quad (45)$$

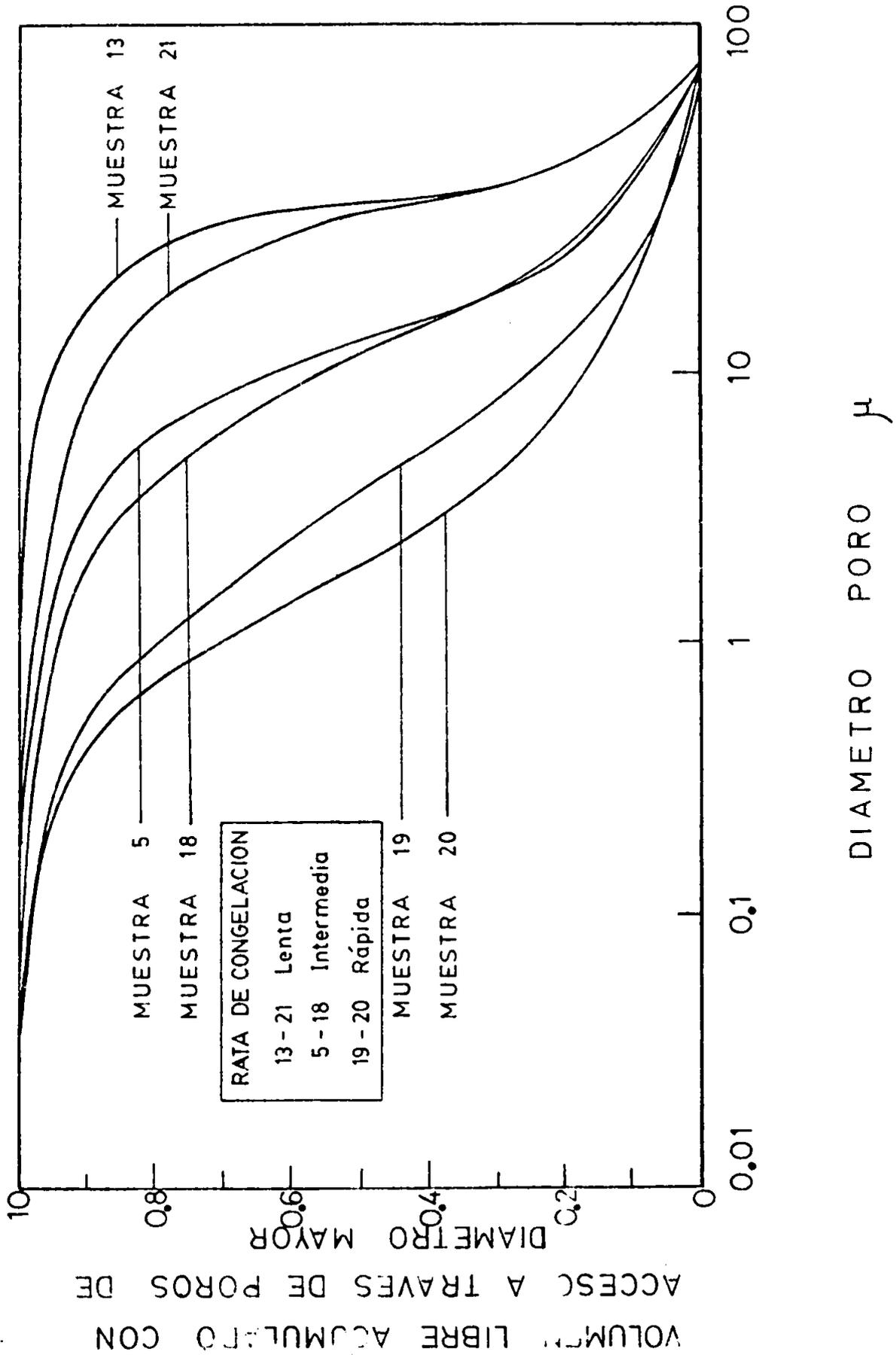


FIGURA 32

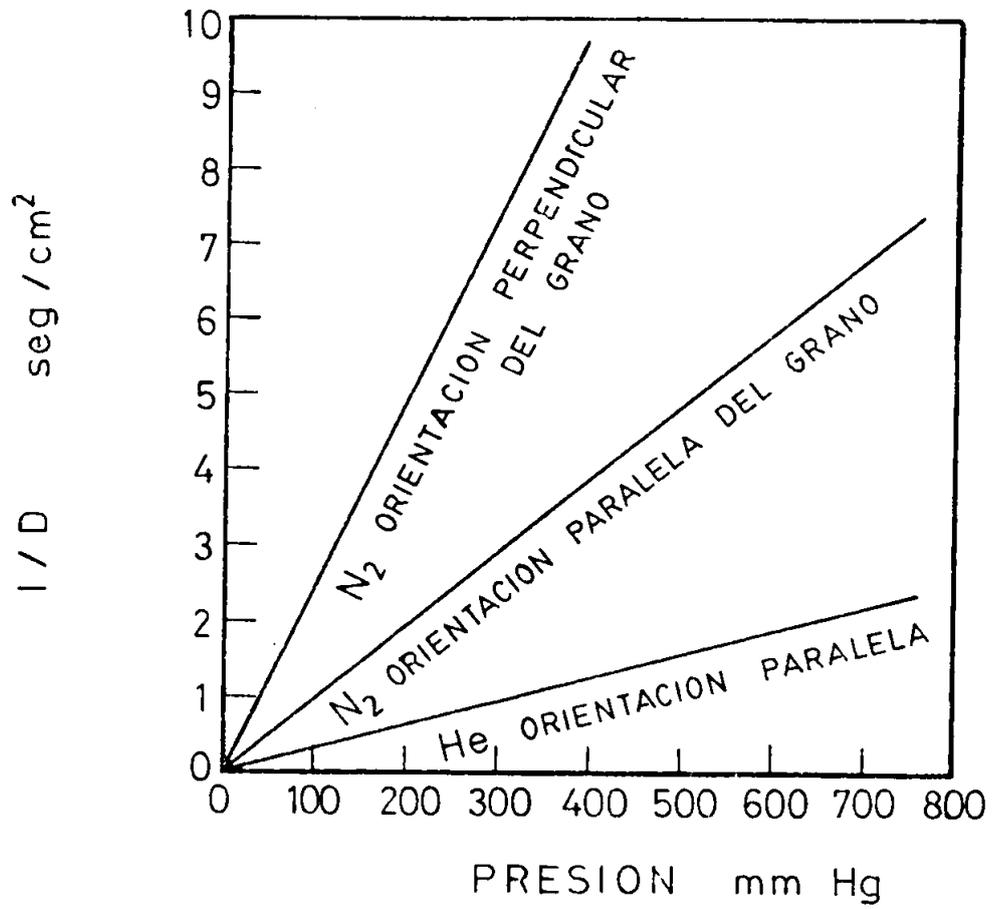


FIGURA 31

Los valores de $p - p_c$ o $T_c - T_a$ se deducen de la gráfica (Figura 29).

4.2.3. Secado de una capa de partículas.-

En el proceso utilizado en la Fábrica, la liofilización es considerablemente más compleja, a causa del hecho de que se trabaja con capas compuestas de muchas partículas y por la geometría del sistema de suministro de calor.

Las consideraciones hechas en el párrafo anterior para una partícula siguen siendo válidas hasta cierto punto, pero es necesario estudiar más de cerca las transferencias de calor y de materia a través de la capa de granos.

La figura 33 muestra esquemáticamente el proceso.- El calor es suministrado por dos placas cuya temperatura depende del programa escogido. Dicho calor es transferido a la bandeja por radiación y por conducción por el gas presente en la cámara. De ahí, el calor pasa al producto por el fondo y por las venas de la bandeja, lo mismo que por la superficie libre que lo recibe directamente. El flujo de materia, por el contrario, tiene lugar únicamente a través de la superficie libre. Dichos flujos están indicados esquemáticamente en la figura 33a,b

En principio, el secado puede tener lugar simultáneamente a partir de las cuatro caras hacia el centro. Las ratas de progresión de los diferentes frentes de secado dependen aquí de las conductibilidades másica y térmica de la capa de granos, lo mismo que de su espesor. Según los valores de esos parámetros, uno u otro de los frentes puede progresar con una rata mayor.

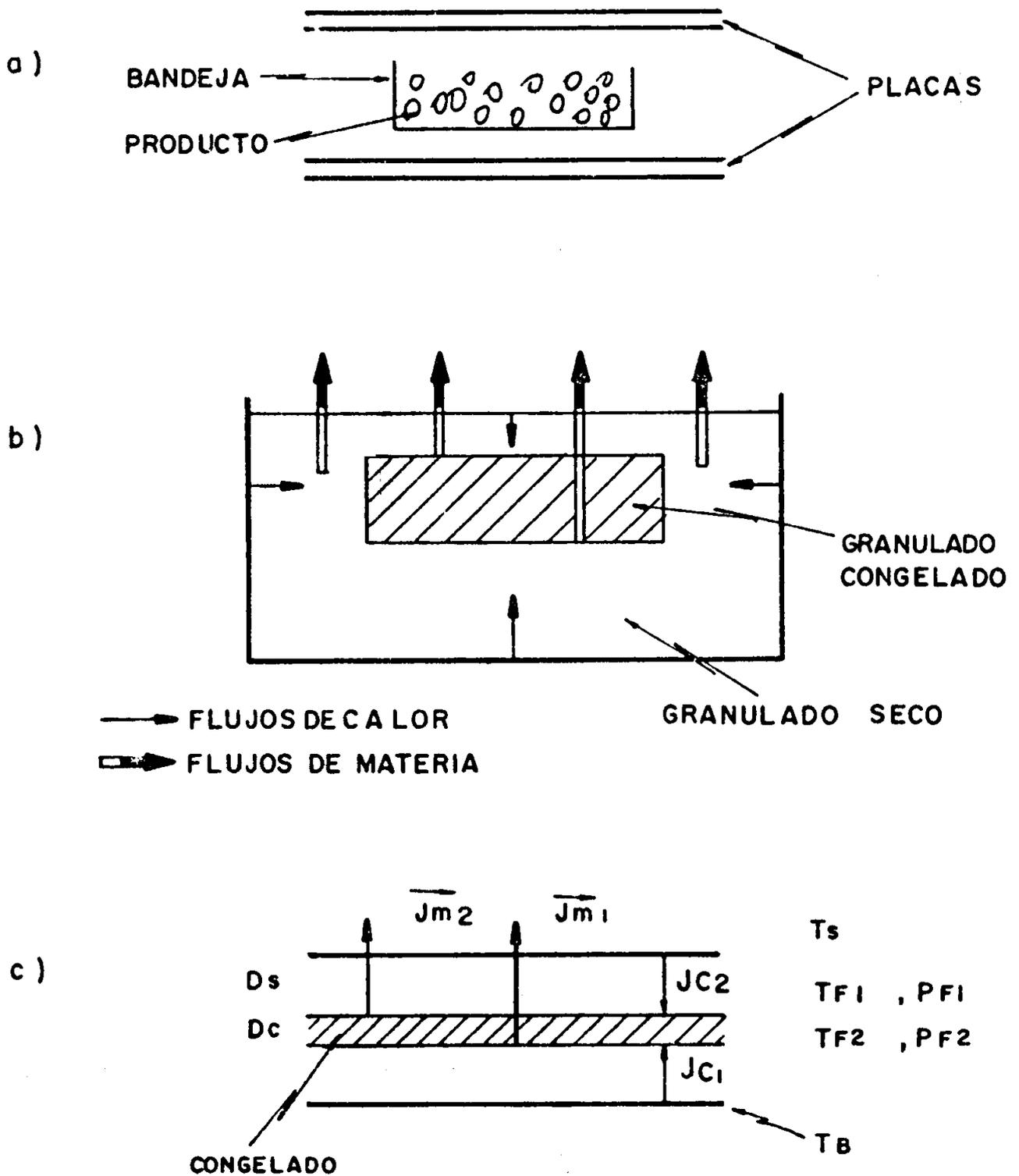


FIGURA 33

Las diversas mediciones de presión y temperatura efectuadas hasta la fecha en la Fábrica tienen - por fin principal el establecimiento de un modelo que, a pesar de la complejidad del problema permita la optimización de los ciclos de liofilización, en función de las características del producto.

4.3. Variaciones de las propiedades físicas del producto.-

4.3.1. El fenómeno de colapso durante la liofilización.-

Es bien sabido que, según las condiciones en que se efectúe el proceso, los poros dejados libres - por la sublimación del hielo pueden cerrarse en - mayor o menor grado.

Dicho fenómeno, denominado colapso, puede ocurrir aún a temperaturas inferiores a la temperatura de fusión del producto. La importancia del colapso - depende de la temperatura de operación y de la estructura del producto, la cual, como vimos, es - función de las condiciones de espumación y de congelación.

El colapso provoca un aumento de la densidad del producto ya que reduce su porosidad y, por la misma razón, puede alterar el desarrollo de la liofilización pues dificulta la transferencia de materia en el producto seco.

4.3.2. Cambios de color durante la liofilización :

Como lo mostraron los trabajos de Pettersen y - Flink , es posible modificar el color del producto final variando las condiciones de liofilización.- En particular, se observa un oscurecimiento de - aquél cuando se aumenta la presión en la cámara.

Como lo vimos anteriormente, un aumento de presión, provoca un desplazamiento del punto de trabajo (figura 29) y una elevación de la temperatura del freno

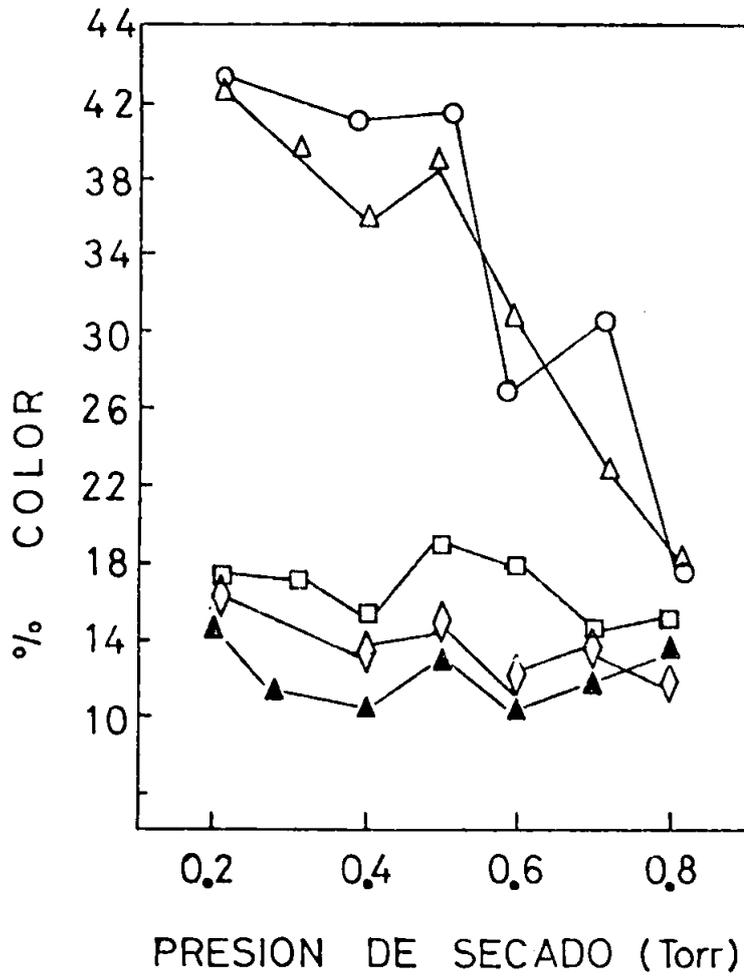
te de secado. Dicho incremento favorece el colapso mencionado anteriormente y, puede, si es suficientemente alto, producir una fusión local del producto. Estos dos fenómenos modifican la estructura superficial del producto y, por lo tanto, su reflectividad. Ello se traduce por un oscurecimiento aparente. La figura 34 muestra algunos resultados obtenidos por esos autores.

4.3.3. Variaciones del peso específico y de la resistencia mecánica del producto.-

Las condiciones de liofilización afectan también el peso específico del producto, a causa del fenómeno de colapso que mencionamos anteriormente. Los trabajos de Petersen y Flink han mostrado que un aumento de la presión, que tiende a favorecer el colapso, produce un incremento del peso específico. El efecto es menos marcado para extractos espumados que para los no espumados.

En este último caso, los que han sido congelados lentamente presentan pesos específicos mayores que los congelados rápidamente, probablemente a causa de una mayor tendencia al colapso.

La resistencia mecánica del producto terminado fue medida por esos autores a través de la reducción de volumen de la muestra después de haber sido agitada durante 30 minutos a razón de 210 golpes por minuto. Aquí se observa que al incrementar la presión, la resistencia mecánica aumenta en casi todos los casos. Igualmente la resistencia del producto congelado rápidamente, es en todos los casos superior a la del que lo ha sido lentamente. Este resultado puede atribuirse al hecho de que al congelar rápidamente la estructura de los cristales es más compleja y su orientación más irregular, lo cual confiere a las paredes entre las burbujas una mayor resistencia. Este punto está siendo investigado con más detalle en el LIQC con particular énfasis en los extractos espumados.



- ◇ muy lenta
- ▲ lenta
- espumado lenta
- △ rápida
- espumado rápida

FIGURA 34

4.4 Retención de aromas

Una de las principales ventajas del secado por sublimación es la alta retención de volátiles que se puede lograr. Para explicar este hecho se han enunciado diversas teorías, entre las cuales podemos mencionar las siguientes:

- a) La teoría de la adsorción de Rey.
- b) La teoría de las microregiones debida a Flink.
- c) La teoría de la difusión selectiva propuesta por Thijssen⁸.

La primera de esas teorías no puede explicar sino una parte reducida de la retención de aromas, razón por la cual no la discutiremos aquí. En lo que se refiere a las otras dos teorías, King mostró que son equivalentes, siendo la de Flink una descripción microscópica y la de Thijssen un punto de vista macroscópico. Por esta razón nos limitaremos aquí a exponer ésta última que se presta mejor a la discusión del fenómeno.

La Figura 35 muestra el modelo del proceso de liofilización utilizado por Thijssen. Como lo hemos visto anteriormente, el producto congelado está subdividido en cristales de hielo puro y sólido eutéctico. Todas las sustancias inicialmente presentes en la solución están aprisionadas dentro de ese sólido, ya que el hielo es perfectamente puro. La sublimación del hielo no conlleva por lo tanto ninguna pérdida de volátiles. Dicha pérdida, sin embargo, puede producirse durante la salida por difusión de las moléculas de agua que han quedado aprisionadas en el sólido eutéctico.

De acuerdo con los trabajos de Thijssen, el coeficiente de difusión de diversas sustancias es función del contenido de agua de la solución. La Figura 36 muestra la variación de los coeficientes de difusión del agua y de la acetona en dos soluciones diferentes (extracto de café y malto-dextrina) a 25°C. En todos los casos cuando la concentración de la solución aumenta, el coeficiente de difusión disminuye considerablemente. Además el coeficiente de difusión de la acetona disminuye más rápidamente que el del agua. Este punto se puede ver más claramente en la Figura 37 en la que se muestra la variación del cociente de los coeficien-

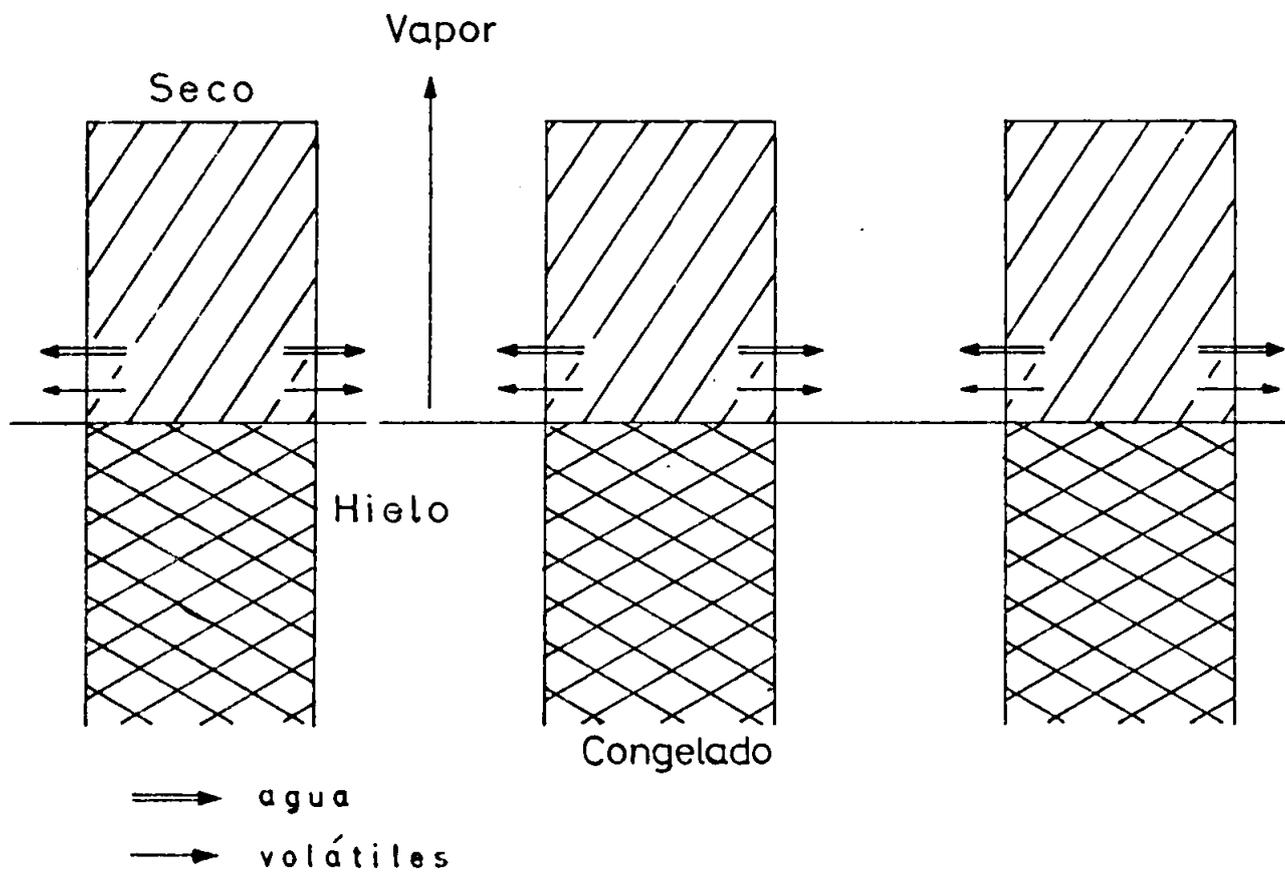


FIGURA 35

te de difusión de la acetona y del agua, con la concentración, en el caso del extracto de café a 25°C. Cuando la concentración es superior al 60% aproximadamente (40% de agua), el coeficiente de difusión de la acetona decrece de manera apreciable con respecto al del agua y el proceso se hace altamente selectivo para esta última. La Figura 38 ilustra la influencia de la temperatura sobre el cociente de los coeficientes de difusión de las mismas sustancias. Es fácil ver que cuanto más baja es la temperatura, más selectivo es el proceso.

Los resultados arriba mencionados explican claramente la alta retención de volátiles durante la liofilización sobre todo si ésta se lleva a cabo a una temperatura lo suficientemente baja. Al salir el agua contenida en el producto cercano a la pared interna del poro, la concentración aumenta muy rápidamente y la zona superficial se convierte en una barrera que deja pasar el agua y retiene selectivamente los volátiles. Este efecto es tanto más acentuado cuanto más pesadas sean las moléculas volátiles como lo muestra la figura 39 en la cual aparecen las curvas correspondientes a diferentes alcoholes.

Estas consideraciones sobre los coeficientes de difusión permiten hacer algunas predicciones sobre los factores que afectarán la retención de aromas durante la liofilización que resumimos a continuación.

- a) Al disminuir la presión en la cámara, baja la temperatura del frente de sublimación, lo cual es favorable para una buena retención.
- b) Un producto congelado lentamente tiene una mayor porosidad, lo cual facilita el transporte de materia y permite que la liofilización se lleve a cabo a una temperatura más baja, mejorando así la retención. Adicionalmente, la congelación lenta produce poros con paredes más gruesas, lo cual favorece la selectividad de la difusión.
- c) Si la capa de producto es gruesa, la temperatura del frente de secado tiende a incrementarse y por lo tanto la pérdida de volátiles.
- d) Una mayor temperatura de las placas de calentamiento a presión fija lleva a un incremento de la temperatura del frente y a una mayor pérdida.

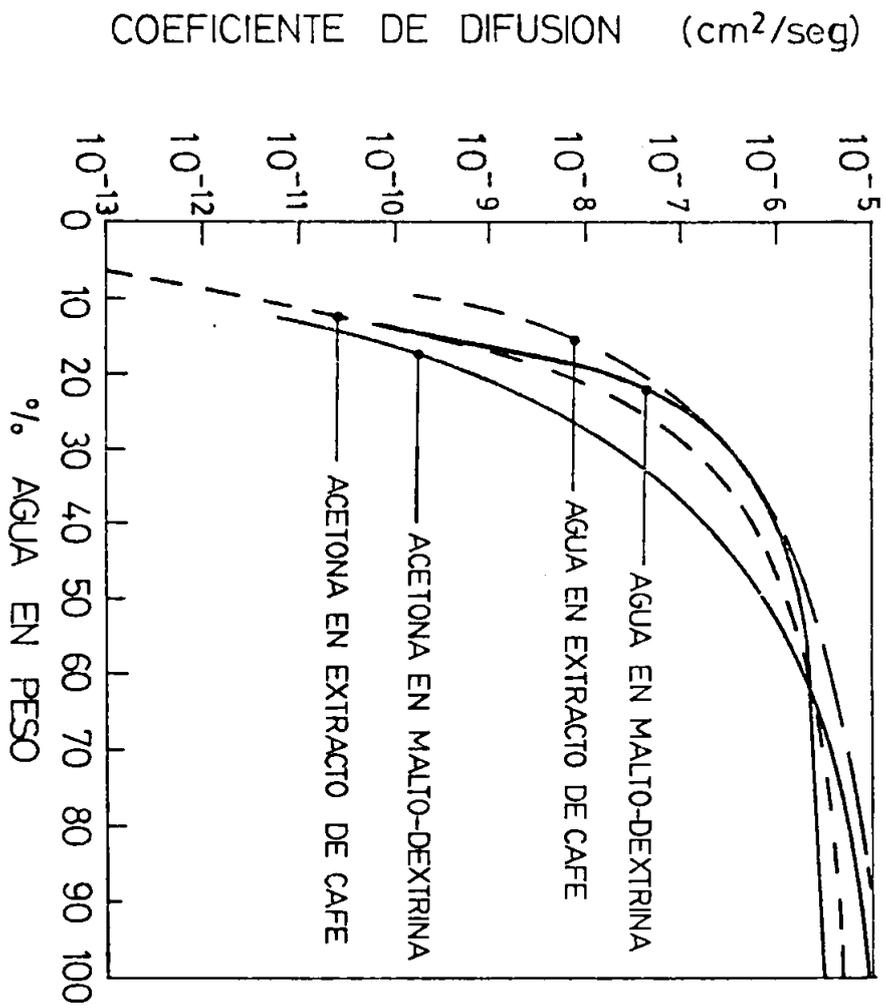


FIGURA 36

- e) Los volátiles de mayor peso molecular serán mejor retenidos.

Estas predicciones han sido verificadas experimentalmente.

La Figura 40 muestra la retención de diferentes alcoholes, obtenida al liofilizar una solución de maltodextrina al 20%, en función de la temperatura de operación. Como se puede ver la retención es tanto mayor cuanto más baja sea la temperatura del frente de sublimación durante el proceso y se incrementa al aumentar el peso molecular.

La influencia de la rata de congelación aparece claramente en la Figura 41 en donde se aprecia que la congelación lenta produce una mucho mejor retención.

La influencia de la presión de trabajo se puede ver en la Figura 42 para diferentes alcoholes. La retención es considerablemente mayor cuando la presión es baja. Adicionalmente se observa que la retención es mejor si se aumenta la concentración inicial de sólidos. Este último punto se puede atribuir al hecho de que al disminuir la cantidad de agua inicialmente presente, se formará menos hielo con el consiguiente aumento del espesor de las paredes.

La teoría que hemos presentado da una imagen clara de los mecanismos de retención de aroma durante la liofilización. Sin embargo, la mayor parte de los trabajos han sido hechos con soluciones modelo tales como la de maltodextrina. Por esta razón su aplicación a casos complejos como el del extracto de café debe hacerse con cierta prudencia. En la actualidad se está llevando a cabo en el LIQC. diversos trabajos destinados a verificar sus límites de validez.

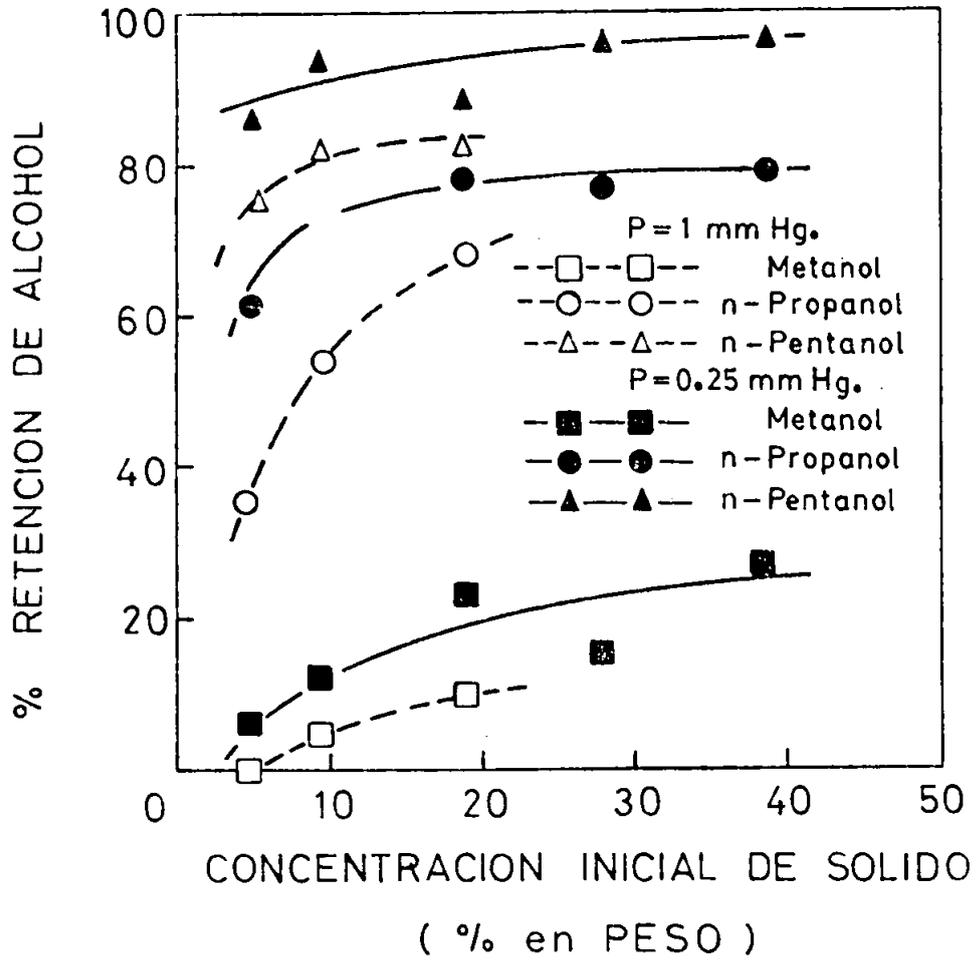
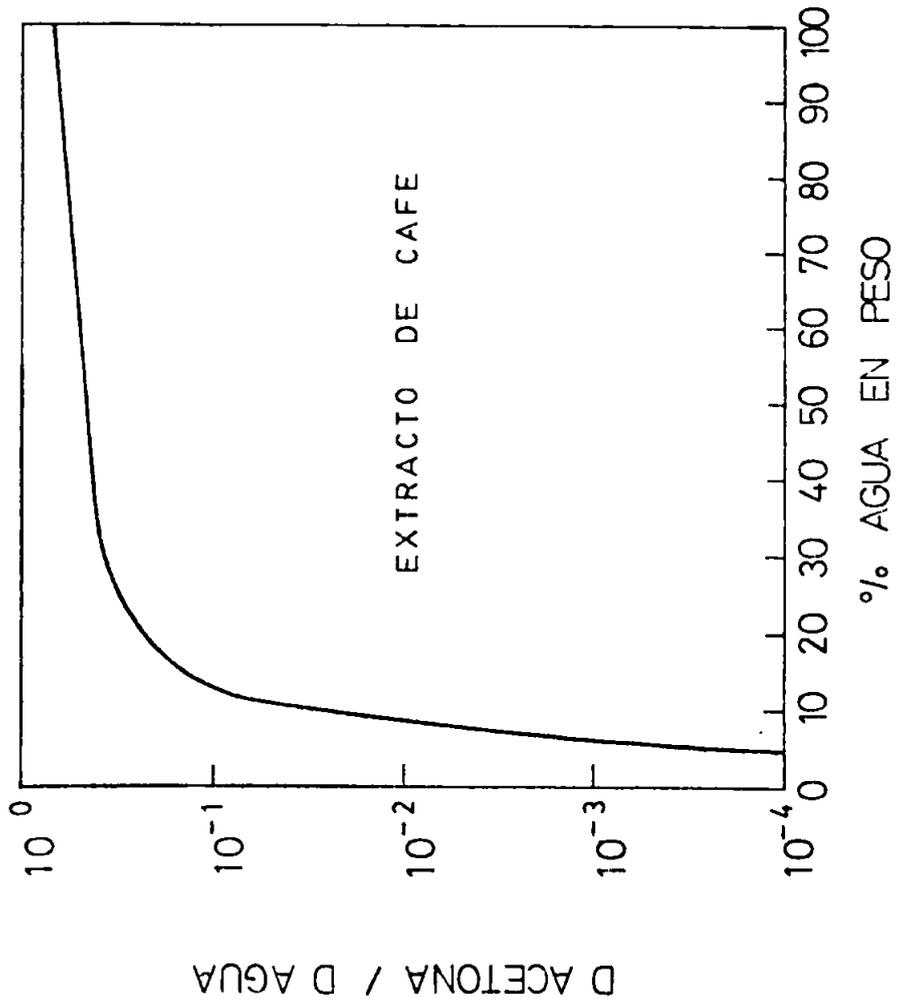


FIGURA 42

FIGURA 37



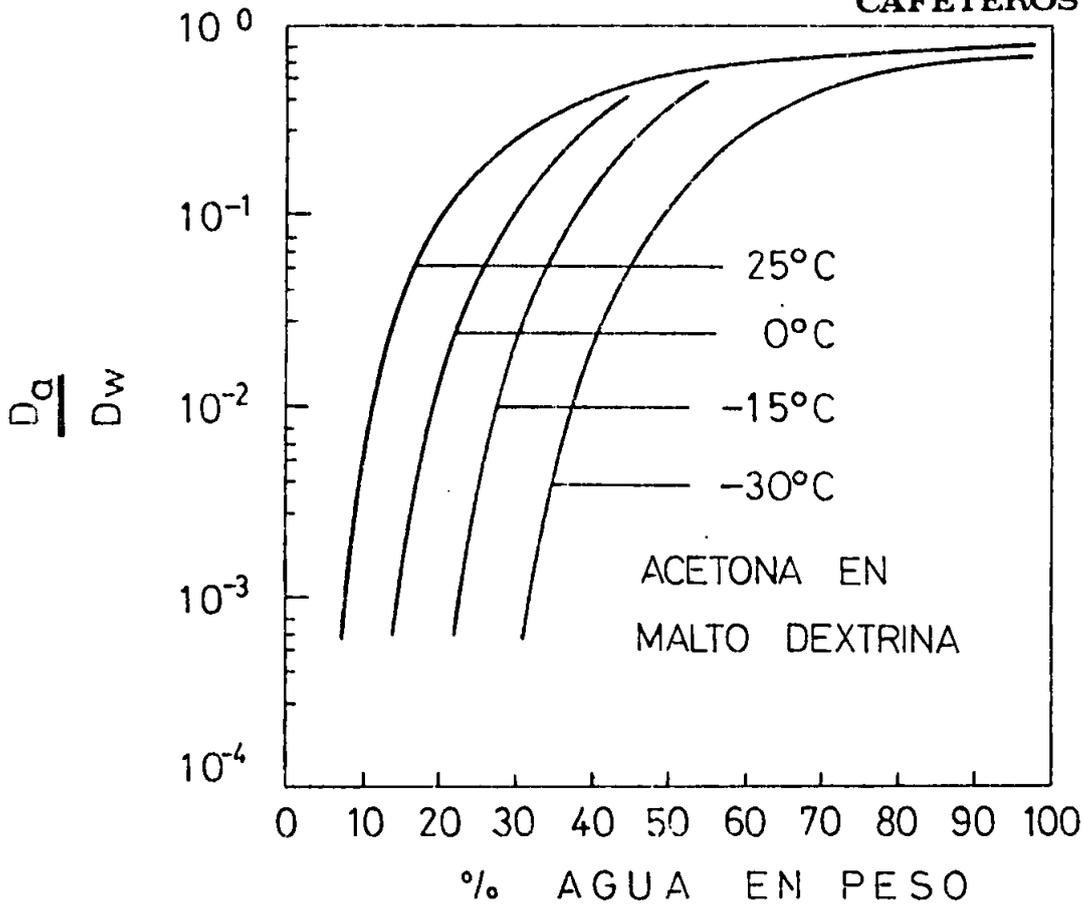


FIGURA 38

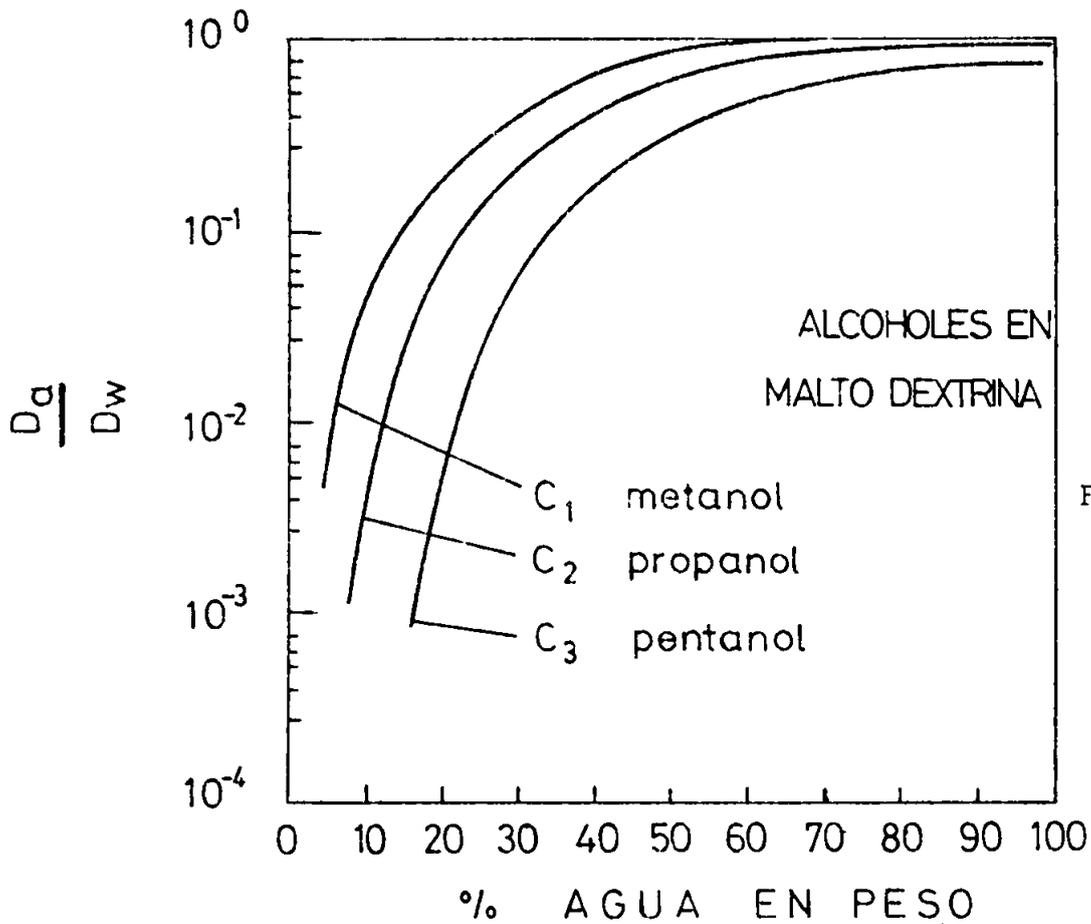


FIGURA 39

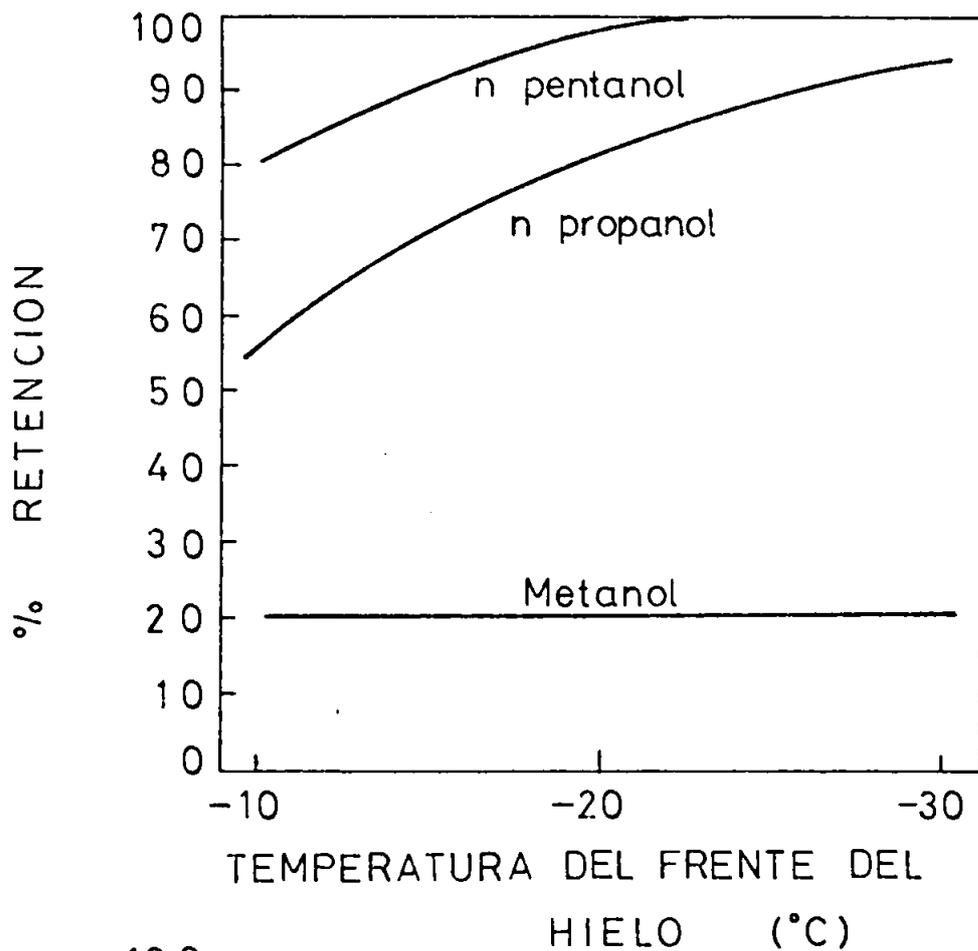


FIGURA 40

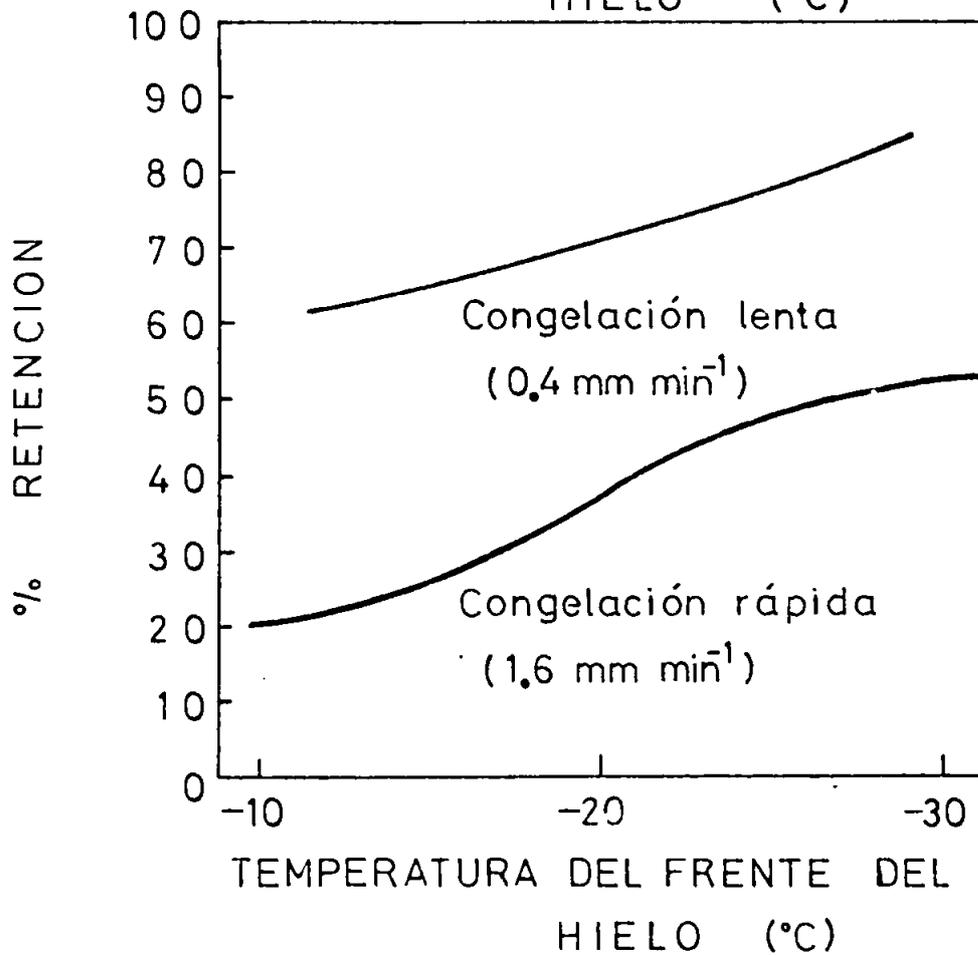


FIGURA 41