



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Estudio del Efecto de la Presión sobre la Deshidratación
Osmótica del Mango”

TESIS DE GRADO

Previo la obtención del Título de:

INGENIERA DE ALIMENTOS

Presentada por:

Elizabeth Cristina Huayamave Lainez

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año - 2005

AGRADECIMIENTO

A MS.c Fabiola Cornejo, Directora de Tesis, por su invaluable ayuda, a mi familia por el apoyo y la paciencia y a todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización y culminación de este trabajo.

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

A MIS HERMANAS

A MI ABUELA

A MIS TIOS

A MI TIA ELISA

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Eduardo Rivadeneira P.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Fabiola Cornejo Z.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Mario Patiño A.
VOCAL

Ing. Priscilla Castillo S.

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“ La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente ; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL ”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Elizabeth Huayamave L.

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador se cultivan y exportan una gran variedad de frutas tropicales entre ellas el mango; el cual se ha convertido en uno de los productos más importantes dentro de las exportaciones no tradicionales del país. Pero debido a las especificaciones de tamaño y peso, existe un excedente de la producción que no es exportable como fruta fresca, haciendo posible el desarrollo de alternativas de aprovechamiento e industrialización de esta fruta de rechazo. Desafortunadamente, los métodos tradicionales de conservación como secado, refrigeración, congelación, etc. causan alteraciones en el color, sabor y textura que afectan considerablemente la calidad del producto final.

En los últimos años se han desarrollado nuevos métodos de preservación que mejoren las características nutricionales, sensoriales y funcionales del alimento. El proceso de deshidratación osmótica, utilizado como un pre-tratamiento, ha obtenido éxito en alcanzar estos resultados, comprobándose adicionalmente una mejor estabilidad durante el almacenamiento. En el proceso de deshidratación osmótica, pedazos de frutas son inmersos en una solución concentrada de azúcar. Debido a la diferencia de concentraciones de solutos entre la fruta y la solución osmótica, se produce una pérdida de agua en la fruta. Esta eliminación parcial de agua permite que en los

tratamientos posteriores de secado o congelación se mejoren las características sensoriales, físico-química del alimentos y se reduzca el tiempo de proceso, implicando así un ahorro de energía (33).

Existen varios factores que influyen en el proceso de deshidratación osmótica, como son la temperatura, tipo de agente osmótico, concentración de la solución osmótica, entre otros (26,33). Recientemente, se han realizado investigaciones sobre la influencia de la aplicación de una presión de vacío en la deshidratación osmótica de frutas como fresas, kiwi, durazno, etc. El objetivo de esta tesis se enfocará a estudiar el efecto de la aplicación de presiones vacío al deshidratar osmóticamente una fruta tropical propia de nuestro país, como es el mango de variedad Tomy Atkins y determinar las ventajas de este proceso, estableciendo un pre-tratamiento que permita obtener productos a partir del mango de rechazo con la más alta calidad organoléptica.

RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado el efecto de la presión de vacío sobre la deshidratación osmótica del mango. Con el fin de ofrecer una alternativa para el pre-tratamiento del mango de exportación, que es rechazado por especificaciones de tamaño y peso, pero que puede ser aprovechado para el desarrollo de otros productos como: deshidratados, congelados, etc. Puesto que con los beneficios que ofrece este pre-tratamiento, se podrán obtener productos de alta calidad organoléptica y competitivos en el mercado.

La variedad de mango de exportación elegida para el estudio fue Tommy Atkins, el cual fue sometido a tres diferentes procesos: deshidratación osmótica a presión atmosférica, deshidratación osmótica a presión de vacío y deshidratación osmótica a pulsos de vacío. En cada uno de ellos se analizó la pérdida de agua, la ganancia de sólidos y los cambios físicos químicos producidos durante los experimentos.

La deshidratación osmótica a presión atmosférica (1030 mbar) , se realizó a temperaturas de 35°C y 45°C ; mientras que las concentraciones de las soluciones de sacarosa fueron 55° Brix y 65 ° Brix ; estos experimentos

permitieron determinar la temperatura y concentración de solución a las que se realizaron los ensayos a las presiones de vacío.

Los experimentos a vacío se realizaron a las presiones absolutas de 140 mbar y 80 mbar. La deshidratación osmótica al vacío, consistió en aplicar una presión de vacío, durante 30 minutos. Mientras que en los ensayos de deshidratación osmótica a pulso se vacío, se aplicó la presión de vacío, por periodos de 5 y 10 minutos. En ambos procesos se examinó el efecto de la presión de vacío y el efecto del tiempo de aplicación de la presión de vacío, sobre las pérdidas de agua y ganancia de sólidos. De igual manera se estableció el efecto de la presión y el tiempo de aplicación de la misma, sobre las velocidades de pérdidas de agua y ganancia de sólidos, así como también sobre las características físico-químicas.

Se compararon las ventajas e inconvenientes de cada uno de los procesos estudiados; determinándose de esta manera el proceso más beneficioso para el pre-tratamiento de mango. Se determinó además los equipos para la implementación de un sistema de deshidratación osmótica al vacío.

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Cultivo de Mango en el Ecuador.

El cultivo y exportación de mango (*Mangifera Indica L*) en el Ecuador se inició hace más de una década, desde entonces, esta fruta tropical se ha convertido en uno de los productos no tradicionales exportables más importantes del Ecuador (2) . Las zonas de producción de esta fruta son las provincias del Guayas y Manabí, en áreas tales como: Balzar, Taura, Tenguel, Naranjal, Chone, Santa Ana (10).

El cultivo de mango cubre un área aproximada de 7.700 Has, con las siguientes variedades exportables: Tommy Atkins (65%), Haden, Kent y Keitt disponibles de octubre a enero (11, 20, 25). Las variedades de exportación introducidas al país han sido escogidas en función al sabor y tamaño para satisfacer la demanda de sofisticados clientes internacionales (2).

1.1.1 Producción y Exportación de Mango en el Ecuador

Los volúmenes de producción del mango en los últimos 5 años son los siguientes:

TABLA 1
PRODUCCIÓN DE MANGO EN EL ECUADOR

Año	1999	2000	2001	2002	2003
Producción (T.M.)	94,802	63,763	88,924	100,911	88,924

Fuente: Base de datos de la FAO, FAOSTAT – Agricultura

Entre el 70% y 75% de la producción de mango del Ecuador se vende en Estados Unidos. Nuestro segundo comprador es Bélgica con el 5.1 %. El resto de la producción se envía a Holanda, Canadá, España, México, Chile, Nueva Zelanda y otros países (25).

En la tabla 2 se presentan las cifras de exportación ecuatorianas para el periodo 1999-2003, en su mayoría de las variedades Tommy Atkins y Kent.

TABLA 2
EXPORTACIONES DE MANGO EN EL ECUADOR

Año	1999	2000	2001	2002	2003
Exportación (T.M.)	15,668	25,502	33,958	30,365	37,621

Fuente: Base de datos de la FAO, FAOSTAT – Agricultura

1.1.2 Estimación del rechazo del mango en el Ecuador

Entre los requisitos que el mango debe presentar para su aceptación en los mercados internacionales, podemos mencionar (9,16,20):

- El mango debe ser presentar la forma específica de la variedad.
- La pulpa debe ser amarilla, jugosa, muy perfumada y no fibrosa.
- El mango debe tener entre 8 -9ºBrix para trayectos largos de almacenamiento
- Los pesos, tamaños y calibres deben ser los establecidos por los importadores.

Las frutas que presentan manchas, quemaduras, ralladuras, rasgos de golpes, daños mecánicos, marchitamiento, picaduras o decoloración grisáceas o simplemente no cumplan con los estándares de peso y tamaño serán desechadas y consideradas frutas de rechazo (25). La estimación del rechazo de la fruta se la realiza en función de la producción menos el volumen de exportación.

TABLA 3
ESTIMACIÓN RECHAZO DE MANGO EN EL ECUADOR

Año	1999	2000	2001	2002	2003
Rechazo (T.M.)	79,134	38,261	54,966	70,546	51,303
Porcentaje	83,47	39,99	61,81	63,9	57,69

Fuente: Base de datos de la FAO, FAOSTAT - Agricultura

1.2 Fundamentos de la deshidratación osmótica

Definición

Deshidratación Osmótica (DO) es un proceso que consiste en la eliminación del contenido de agua de un alimento, mediante la inmersión de este, en solución acuosa de alta concentración de soluto (solución hipertónica). La deshidratación se debe a que ocurre un proceso de osmosis entre el alimento y la solución concentrada (26).

Osmosis

Es bien conocido que una membrana semipermeable vegetal es capaz de separar dos soluciones de diferente concentración en soluto, de modo que el agua pura pasa a través de la membrana. El agua se traslada desde la disolución más concentrada en agua (alimento) hacia la menos concentrada (solución hipertónica), de tal manera que tienden a igualarse las concentraciones de agua en ambos lados de la membrana (1,26).

La compleja pared celular del alimento que actúa como la membrana semipermeable, no es completamente selectiva, resultando dos flujos de transferencia de masa importantes: la difusión de agua del alimento a la solución y la difusión del soluto de la solución al alimento. Presentándose además un tercer flujo poco apreciable que consiste en la mínima pérdida de solutos propios del alimento (sales minerales, ácidos orgánicos, otros) que aunque cuantitativamente es insignificante, puede tener alguna importancia a nivel nutricional y organoléptico (1).

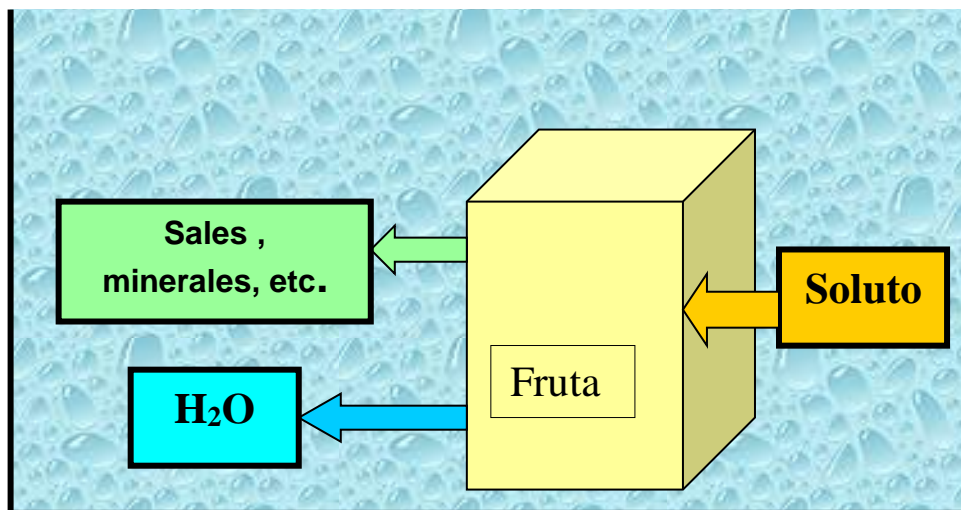


FIGURA 1.1 TRANSFERENCIA DE MASA EN LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA (1).

Actividad de agua del alimento y la solución osmótica.

La actividad del agua (a_w) es la disponibilidad del agua para el crecimiento de microorganismos y las reacciones bioquímicas. Esta es importante en la osmosis porque la fuerza motriz para que se lleve a cabo la deshidratación osmótica es la diferencia de potencial químico entre el alimento y la solución osmótica. Y este potencial químico está relacionado con la actividad del agua según la expresión (1):

$$\mu_i = \mu_i^{\circ} + RT \ln a_w \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde:

μ_i = Potencial químico

μ_i° = Potencial químico de referencia

R = Constante de gases

T = Temperatura

a_w = Actividad de agua de la solución.

De este modo se puede observar que la actividad de agua de la solución osmótica debe de ser menor a la del alimento para que se pueda llevar a cabo el proceso. El proceso de osmosis llega a su término hasta que las actividades de agua de la solución osmótica y el alimento se igualan (1).

1.2.1 Factores que afectan la deshidratación osmótica.

Los factores que pueden afectar la deshidratación osmótica son los siguientes:

- Naturaleza del alimento.
- Tamaño de los trozos.
- Tipo de solución osmótica.
- Concentración de la solución osmótica.
- Temperatura de la solución osmótica.
- Tiempo.
- Relación peso alimento-peso solución osmótica.
- Presión.

A continuación se detallan cada uno de los factores antes mencionados:

Naturaleza del alimento.

Torreggiani (1996) encontró que cada alimento tiene una estructura celular diferente, por lo que permite el paso de moléculas distintas. La permeabilidad del tejido varía con la madurez, estructura física, condiciones de almacenamiento, compactación de tejido, contenido de sólidos y espacios intercelulares. Entonces que existe una influencia de las características del tejido celular del alimento sobre la pérdida de agua y ganancia de sólidos en un proceso de deshidratación osmótica (30).

Tamaño de los trozos.

Al reducir el tamaño del trozo sometido a una deshidratación osmótica aumenta la superficie específica y también la pérdida de agua (30).

Tipo de solución osmótica.

El tipo de agente osmótico afecta los parámetros de pérdida de agua y ganancia de sólidos. La selección de solutos o solutos para la solución osmótica esta basado en tres factores:

- Características sensoriales del producto.
- El costo de los solutos.
- El peso molecular de los solutos.

Los agentes osmóticos más comúnmente usados son: sacarosa para frutas y cloruro de sodio para vegetales, pescado y carne. Otros agentes osmóticos incluyen la glucosa, fructuosa, lactosa, jarabe de maíz, glicerol, etc (1,26).

El agente osmótico debe tener una alta solubilidad y un alto poder depresor de la actividad de agua. De acuerdo al tipo de soluto utilizado, se afecta directamente a la velocidad de deshidratación. Si se usan solutos de alto peso molecular se incrementa la pérdida de agua y se reduce la ganancia de sólidos. Mientras que cuando se usan solutos de bajo peso molecular sucede lo contrario porque las moléculas pueden migrar más fácilmente al interior del tejido. Existen diferentes combinaciones de máxima remoción de agua, propiedades sensoriales, bajo costo e impregnación de solutos (26,30).

Concentración de la solución osmótica.

La transferencia de masa, principalmente la pérdida de agua, se ve favorecida por el uso de soluciones altamente

concentradas debido a que la actividad de agua de la solución baja al aumentar la concentración de la misma (13,26,30,32).

Temperatura de la solución osmótica.

La temperatura tiene un importante efecto sobre la deshidratación osmótica, pues al aumentar la temperatura la pérdida de agua aumenta. En cambio la ganancia de sólidos se ve menos afectada por este aumento de temperatura, pues los sólidos no pueden difundirse tan fácilmente como el agua a través de la membrana celular (13,26,30,32).

Sin embargo no conviene sobrepasar los 49°C ya que se generan problemas por pardeamiento enzimático y se deteriora el sabor (26,30,32).

Tiempo.

En la medida en que aumenta el tiempo de procesamiento, se produce una mayor pérdida de agua y una mayor ganancia de sólidos, sin embargo, no conviene deshidratar más allá de una pérdida del 50% del peso pues la tasa osmótica disminuye en el tiempo (30,32).

Relación peso alimento - peso solución osmótica.

La ganancia de sólidos y la pérdida de agua se incrementan al aumentar la relación peso de la solución – peso del alimento.

Se han realizado estudios en piñas donde se observó que la pérdida de peso aumento hasta que la relación peso de la solución-peso de piña fue de 6:1 (26).

Presión.

La deshidratación osmótica bajo condiciones de presión por debajo de la presión atmosférica es una nueva técnica de deshidratación osmótica conocida como deshidratación osmótica a vacío (DOV). Con los tratamientos al vacío, la velocidad de pérdida de agua aumenta, reduciendo el tiempo del proceso de deshidratación osmótica (3,5,6,7).

La deshidratación osmótica con pulsos de vacío (DOPV) es una mejoramiento de la deshidratación osmótica al vacío , en donde el vacío es aplicado durante periodos cortos de tiempo seguido de largos periodos de deshidratación osmótica a presión atmosférica (3,5,6,7).

Bajo condiciones de vacío se liberan gases atrapados en el tejido, dejando el espacio libre para la solución osmótica, aumentando así la superficie de contacto entre el alimento y la solución osmótica. Por lo tanto el volumen de gas atrapado en los poros de una fruta, representado por la porosidad efectiva (ε_e), tiene un efecto importante en los tratamientos de vacío (3,5,6,7).

1.2.2 Mecanismos de Transferencia de Masa en la Deshidratación Osmótica

Deshidratación osmótica a presión atmosférica.

Como se comentó al inicio de este capítulo, la transferencia de agua es uno de los aspectos más importantes durante la deshidratación osmótica. El mecanismo mayoritario por el que se realiza la transferencia de materia es la difusión debida al gradiente de concentración existente entre el alimento y la solución osmótica (1, 12).

La velocidad de difusión del agua puede estimarse mediante la ley de Fick como sigue (1):

Para lámina:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde w son las pérdidas de agua o ganancias de azúcar en el tratamiento osmótica, t es el tiempo, D es el coeficiente de difusión y x es el espesor de la lámina (1).

Crack (1956) utilizo una expresión analítica para obtener la siguiente expresión lineal de la ecuación anterior.

$$\frac{w_{pt}}{w_{p\infty}} = 1 - \sum \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+\alpha+\alpha^2q_n^2} \exp\left[-\frac{Dq_n^2t}{z^2}\right] \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde:

W_{pt} = pérdidas de agua en el tiempo t

$W_{p\infty}$ = pérdidas de agua en el equilibrio

α = captación fraccional

$q_n = \tan q_n = \alpha q_n =$ raíces positivas.

z = espesor de la capa.

D = difusividad aparente.

t = tiempo.

Estas ecuaciones se pueden resolver utilizando una regresión no lineal y una determinada difusividad aparente.

Pero generalmente un proceso de deshidratación osmótica es evaluado determinando las pérdidas de agua y ganancia de sólidos (1).

Deshidratación osmótica a presiones de vacío

El mecanismo hidrodinámico (HDM) y el fenómeno deformación- relajación (DRP) han sido propuestos por Pedro Fito, et al (1993), para la explicación de los fenómenos de transferencia de masa ocurridos durante la deshidratación osmótica al vacío (5,7,8).

Mecanismo Hidrodinámico y Fenómeno deformación - relajación.

El mecanismo hidrodinámico se presenta cuando se sumergen estructuras porosas en líquidos bajo condiciones de vacío. Este mecanismo describe la transferencia de masa entre la parte interna de los poros y la fase líquida externa, como resultado de la diferencias de presión actuando como fuerzas impulsoras controladas por la compresión y expansión del gas ocluido en los poros de la estructura (5,7,8). La figura 1.2 representa lo que ocurre en un poro cilíndrico del alimento sumergido en un líquido y sometido a una presión de vacío.

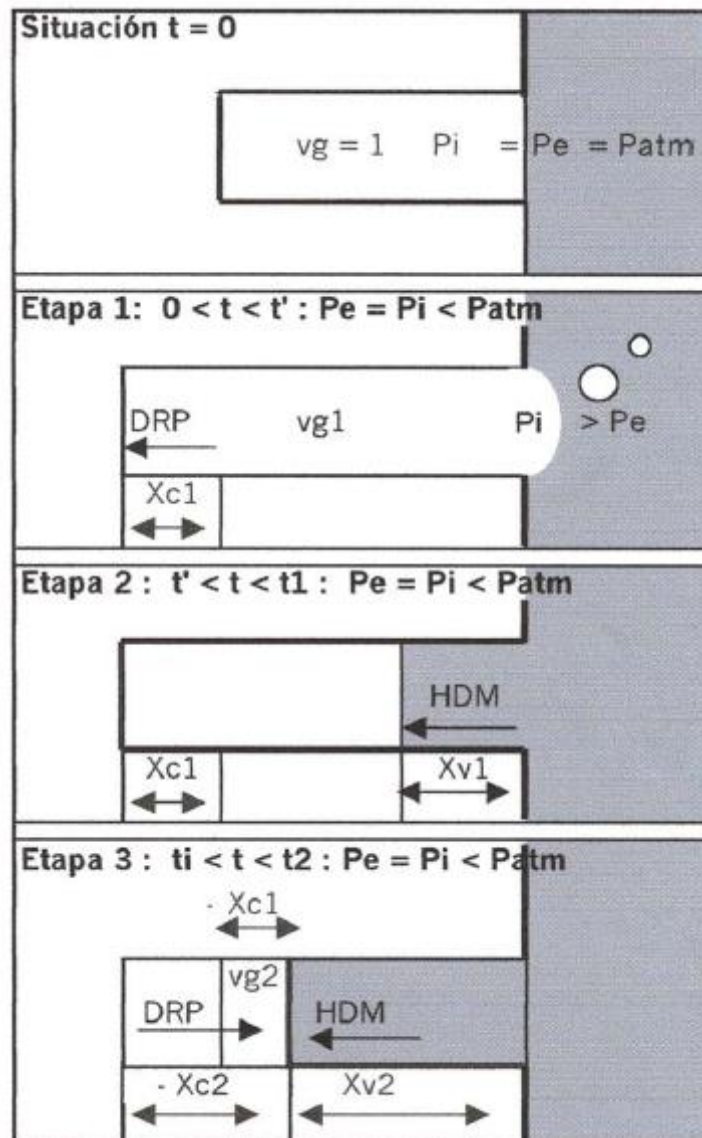


FIGURA 1.2 DIAGRAMA DE UN SISTEMA SÓLIDO-LÍQUIDO, SUFRIENDO LOS FENÓMENOS DE DEFORMACIÓN - RELAJACIÓN SEGUIDO POR EL MECANISMO HIDRODINÁMICO (3,5).

El volumen del gas atrapado en el poro (V_{go}) a un $t = 0$, antes de la interacción sólido-líquido, fue seleccionado como referencia para los cálculos:

$$V_{go} = 1$$

La razón entre el volumen total del gas en la muestra a un $t = t_o$ y el volumen inicial de la muestra, ha sido definida como la porosidad efectiva (ε_e) (3,5).

$$\varepsilon_e = \frac{V_{go}}{V_o} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

En la etapa 1 se aplica vacío para aumentar la presión interna (P_i) respecto a la presión externa (P_e) provocando que el gas atrapado en el poro se expanda y fluya hacia el exterior, esto provoca además que la matriz sólida se deforme X_{c1} , aumentando el tamaño del poro siendo:

$$V_{g1} = 1 + X_{c1} \quad (\text{Ec.1.5})$$

En la etapa 2 la salida del gas del poro cesa cuando las presiones internas y externas se igualan ($P_i = P_e$). El sistema

se mantiene a esta presión de equilibrio que es la presión de trabajo por un cierto tiempo (t_1), entonces ocurre el HDM como consecuencia del gradiente de presiones entre la presión interna del gas atrapado en los poros y la presión del sistema, provocando que los espacios intercelulares se llenen parcialmente de líquidos, un volumen X_{v1} . Se asume además que no ocurre el DRP en esta etapa (3,5).

En la etapa 3 se reestablece la presión atmosférica al sistema por un cierto tiempo (t_2) y nuevamente se presenta el HDM por diferencia entre las presiones interna y externa, durante este tiempo cierta cantidad de líquido (X_{v2}) es transportado al interior de la matriz en lugar del gas, produciéndose una nueva deformación de la matriz del sólido representada por X_{c2} . Al final del proceso, el volumen del líquido penetrado (X_v) debido al HDM, y la deformación de la matriz sólida (X_c), puede ser calculado así (3,5):

$$X_v = X_{v1} + X_{v2} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

$$X_c = X_{c1} + X_{c2} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Si analizamos en función de las presiones. En la etapa 3, el interior del poro está ocupado por gas a una presión P_i , mientras que el líquido exterior está a una presión P_e . Donde P_e es igual a la presión del sistema P_2 más la presión de capilaridad P_c , la cual puede ser calculada por la ecuación de Young – Laplace (3,5):

$$P_c = \frac{8\sigma}{D^2} \quad (\text{Ec.1.8})$$

Donde:

σ = Tensión superficial

Como sabemos la penetración de líquido de un poro, se deben a los efectos de gradientes de presión que pueden ser calculados por (5):

$$-\Delta p + \frac{32\mu z^2}{D^2} X_v \frac{dx_v}{dt} = 0 \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Donde:

D = Diámetro del poro

z = longitud del poro

μ = viscosidad del líquido

x_v = fracción del volumen del poro ocupada por el líquido, que expresa la profundidad de penetración del líquido en el poro.

El aumento en la presión o la fuerza impulsora será progresivamente disminuida a consecuencia de que la presión P_i se incrementa cuando el gas es comprimido. Asumiendo una compresión isotérmica se tiene:

$$-\Delta p = P_e - \frac{P_i}{1 - x_v} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

Combinando la ecuación 1.9 y 1.10 se obtiene:

$$P_e - \frac{P_i}{1 - x_v} + \frac{32\mu L^2}{D^2} X_v \frac{dx_v}{dt} = 0 \quad (\text{Ec. 1.11})$$

La condición de equilibrio se alcanza cuando las presiones llegan a ser iguales y se tiene que:

$$\frac{dx_v}{dt} = 0 \quad (\text{Ec. 1.12})$$

De las ecuaciones 1.11 y 1.12 en condiciones de equilibrio se deduce que:

$$x_v = \frac{(P_e - P_i)}{P_e} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

Sustituyendo en la ecuación 1.13:

$$P_e = P_2 + P_c \quad (\text{Ec. 1.14})$$

$$P_i = P_1 \quad (\text{Ec. 1.15})$$

Por lo tanto:

$$x_v = \frac{P_2 + P_c - P_1}{P_2 + P_c} \quad (\text{Ec 1.16})$$

Cuando no hay gradientes de presión impuestos sobre el sistema, $P_1 = P_2$, y la fuerza impulsora es P_c , este sería el caso de deshidratación osmótica a presión atmosférica entonces:

$$x_v = \frac{P_c}{P_2 + P_c} \quad (\text{Ec. 1.17})$$

Esta ecuación se puede simplificar a:

$$x_v = 1 - \frac{1}{r} \quad (\text{Ec. 1.18})$$

Donde r es la razón de compresión y se define por la ecuación 1.19:

$$r = \frac{P_2 + P_c}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} + \frac{P_c}{P_1} \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Si se define R y P_r como:

$$R = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{Ec. 1.20})$$

$$P_r = \frac{P_c}{P_1} \quad (\text{Ec. 1.21})$$

Entonces:

$$r = R + P_r \quad (\text{Ec. 1.22})$$

En algunos casos, P_r es mucho más pequeña que R y es posible aceptar que:

$$r = R \quad (\text{Ec. 1.23})$$

Una vez que x_v ha sido calculada, este cálculo se puede extender a la fracción volumétrica total del alimento ocupado por la solución (X_v), multiplicándolo por la porosidad efectiva (ε_e) entonces:

$$X_v = \varepsilon_e x_v \quad (\text{Ec. 1.24})$$

La fracción volumétrica total del alimento ocupado por la solución (X_v) puede ser calculado también por la ecuación 1.25:

$$X_v = \frac{(M_f - M_o)}{\rho V_o} \quad (\text{Ec. 1.25})$$

Donde:

M_o = Masa inicial de la muestra (g)

M_f = masa de la fruta después de un tiempo t de ser sometido a un proceso de deshidratación osmótica en condiciones de vacío. (g)

ρ = densidad de la solución de azúcar. (g / cm³)

V_o = volumen inicial de la fruta. (cm³)

Combinando las ecuaciones 1.24 y 1.18 se obtiene que:

$$X_v = \varepsilon_e \left(1 - \frac{1}{r} \right) \quad (\text{Ec. 1.26})$$

Siendo:

$$r = \frac{P_t}{P_{atm}} \quad (\text{Ec. 1.27})$$

Donde:

P_t = Presión de vacío.

P_{atm} = Presión atmosférica.

1.2.3 Deshidratación Osmótica como pre- tratamiento de frutas.

Es importante destacar que una deshidratación osmótica no genera productos estables en el tiempo, por lo que preferentemente se debe usar como un pretratamiento de otros procesos como secado, congelado, pasteurizado, enlatado ,etc. Otra alternativa es combinarla diferentes factores limitantes para el desarrollo microbiano o deterioro enzimático con una disminución de la actividad de agua (producida por una deshidratación osmótica). Estos factores serían pH,

temperatura de almacenamiento, preservantes químicos, envasado al vacío, entre otros (32,33).

La deshidratación osmótica como un pre-tratamiento, principalmente porque produce cambios en la composición química de la fruta o vegetal con la pérdida de agua y la ganancia de sólidos. Las frutas y vegetales entonces se convierten entonces en alimentos con diferentes relaciones entre los sólidos solubles y el agua, entre los sólidos solubles e insolubles, entre azúcares y sales y entre azúcares y ácidos. De esta manera se transforma la formulación del alimento mediante un fenómeno natural y no destructivo como es la osmosis (32).

Al utilizar la deshidratación osmótica antes de un secado convencional, se limita o elimina el uso de dióxido de azufre, debido a la acción protectora de los sacáridos, al ganar sólidos. Además se incrementa la estabilidad de los pigmentos durante el proceso de secado y el almacenamiento (32).

La congelación industrial de frutas y hortalizas requiere de una considerable energía para congelar la gran cantidad de agua

que existe en los productos frescos. Sin embargo, al remover una proporción importante de agua mediante la deshidratación osmótica, se produciría una reducción del calor latente de congelación, habría menor demanda energética en el proceso, mayor velocidad de congelación, menor colapsamiento de la estructura y menores pérdidas por goteo al descongelar, reducción de peso y volumen de los productos congelados para almacenar y transportar. En la figura 1.3 se muestra las aplicaciones de la deshidratación osmótica como un pretratamiento (32,33).

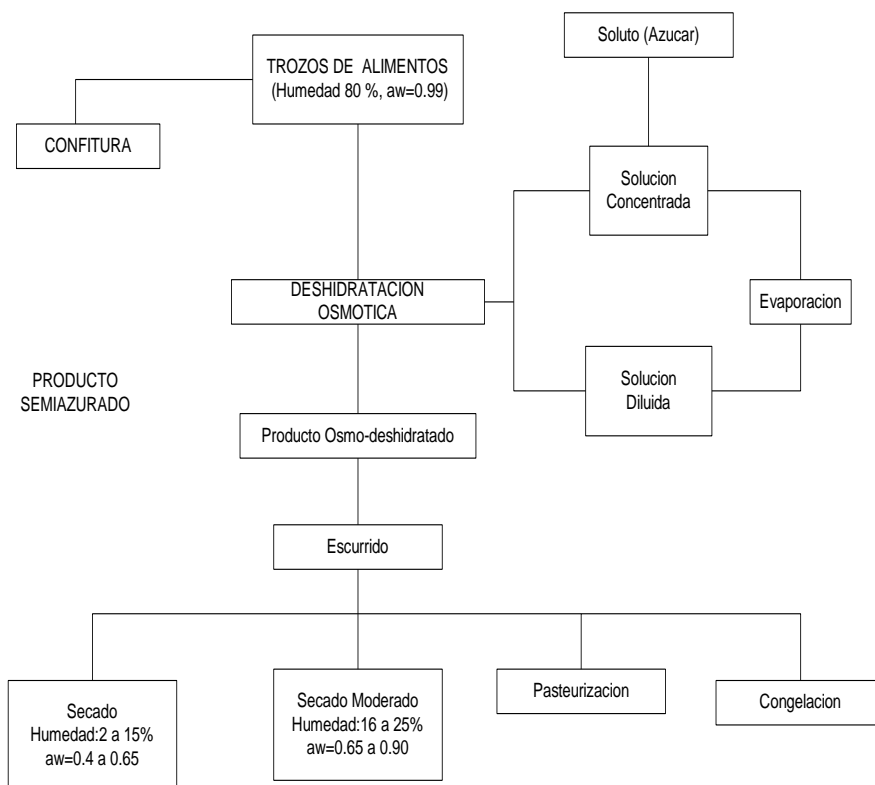


FIGURA 1.3 APLICACION INDUSTRIAL DE LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA. (26)

Ventajas de la deshidratación osmótica

La deshidratación osmótica aplicada principalmente a frutas presenta algunas ventajas:

1. La fruta obtenida conserva en alto grado sus características de color, sabor y aroma. Al aplicar temperaturas moderadas durante el proceso, el daño que se produce sobre el sabor y el

color es mínimo y hay una mayor retención de compuestos volátiles los cuales se perderían a altas temperaturas (31,32).

2. La textura final mejora considerablemente, ya que las células no colapsan al perder agua y, además, la incorporación de solutos tiene un efecto protector sobre la estructura celular, haciendo al alimento más resistente a tratamientos posteriores (32,33).

3. La ausencia de oxígeno en el interior de la masa de jarabe donde se halla la fruta, evita las correspondientes reacciones de oxidación (pardeamiento enzimático), lo que evita el uso de sulfitos (30,32).

4. La relativa baja actividad de agua del jarabe concentrado, no permite el fácil desarrollo de microorganismos que rápidamente atacan y dañan las frutas en condiciones ambientales por lo tanto no se requiere la aplicación de agentes antimicrobianos (1,26).

5. El uso de azúcar (sacarosa) o jarabes y melazas se pueden reutilizar bien sea en nuevos procesos o para edulcorar otros productos.

Desventajas de deshidratación osmótica

1. No es posible aplicarla a todas las frutas. Solo se emplean las frutas que presentan estructura sólida y pueden cortarse en trozos. Tampoco se recomiendan las frutas que poseen alto número de semillas de tamaño mediano como la mora o guayaba.

2. Los productos obtenidos no son estables en el tiempo, es necesario aplicar otro proceso o combinarlo con otro método de conservación.

CAPÍTULO 2

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

2.1.1 Materias primas

Mango

Para los experimentos se utilizó el excedente de la producción de mango de exportación, en el Ecuador de la variedad Tommy Atkins. Se establecieron las características que debe tener el mango para el estudio, las cuales se detallan en la tabla 4.

Los mangos además debieron cumplir con las siguientes características:

- Enteros, de aspecto fresco y consistencia firme.
- Sanos, libres de ataque de insectos, o enfermedades que impidan el consumo.
- Limpios, exentos de olores, sabores o materias extrañas visibles.

- Libres de magulladuras profundas, humedad exterior anormal.

TABLA 4
CARACTERÍSTICAS DEL MANGO QUE SE USA EN LOS
EXPERIMENTOS

Características	
Variedad	Tommy Atkins
Origen	Ecuador
Sólidos solubles¹	9.2 ± 1
pH	4
Actividad de agua	0.99
Acidez²	0,8854
Índice de madurez³	10.39
Humedad	85 %

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

¹ Grados Brix

² Kg de ácido predominante / 100 Kg de muestra

³ (Sólidos solubles / acidez de la fruta) .

Solución osmótica

El agente osmótico comúnmente utilizado para frutas es la sacarosa. La sacarosa tiene una masa molecular de 342.30 y su solubilidad es de 204 g por 100 g de agua a 20 ° C. Las soluciones de azúcar usadas como soluciones osmóticas permiten una alta reducción del contenido de humedad del producto sumergido en ella, pues actúa como un depresor de la actividad de agua (21). Pero además presentan otras ventajas como la reducción del pardeamiento y un aumento en la retención de los compuestos volátiles de las frutas.(1)

La sacarosa utilizada para la preparación de las soluciones osmóticas fue la azúcar comercial , la cual fue adquirida en los supermercados de la ciudad.

Las soluciones se prepararon disolviendo el azúcar en agua purificada a una temperatura de 56 ° C. Las concentraciones de las soluciones osmóticas con las que se llevaron a cabo los experimentos fueron: 55 °Brix y 65° Brix.

2.1.2 Equipos utilizados e implementados para el desarrollo de la investigación.

Equipos empleados en el desarrollo del estudio

Durante el desarrollo de este estudio se utilizaron diversos equipos. Las características de los mismos se especifican en la tabla 5, que se muestra a continuación:

TABLA 5
EQUIPOS UTILIZADOS EN LAS DIFERENTES ETAPAS EXPERIMENTALES

Etapa de estudio	Equipos y Materiales	Características del equipo
Preparación de jarabes	Balanza digital Kern	Capacidad máxima: 610 g desv = 0.01 g
	Baño María Fanem	Rango de temperatura: 28 ° C – 56°C
	Refractómetros Modelo RHB 32ATC	Rango de 28° Brix - 62 ° Brix
	Probeta de vidrio	Capacidad : 1000 ml
Deshidratación osmótica a presión atmosférica y presión de vacío	Estufa Mermmet UM 500	Rango de temperatura: 30°C – 220° C Capacidad : 108 l
	Frascos de vidrio	Capacidad : 250 g
	Termómetro marca : Boeco	Rango de temperatura: -10° C – 200°C
	Cronómetro Dual Timer	Rango de tiempo: segundos, minutos , horas.
	Balanza digital Kern	Capacidad máxima: 610 g desv. = 0.01 g
Determinación de sólidos solubles	Refractómetros Modelo RHB 32ATC	Rangos: 0° Brix -32 ° Brix 28°Brix- 62 ° Brix. 45°Brix-82°Brix.
Determinación de volumen	Calibrador Vernier Marca: Sylvac	Modelo: S 235. Rango de medición : 0.01 mm -150 mm

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Equipos implementados para el desarrollo del estudio.

Para llevar a cabo el estudio de deshidratación osmótica a presiones de vacío se diseñó y armó un equipo que permita el desarrollo de estos experimentos. En la tabla 6 se indican los componentes del equipo y sus características. Mientras que en las figuras 2.1 y 2.2 se muestra el equipo de deshidratación osmótica al vacío y sus componentes.

TABLA 6

COMPONENTES DEL EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA AL VACÍO

Equipos	Características
1. Tanque Hermético	Material : acero al carbono recubierto con pintura epóxica. Dimensiones : Altura : 45 cm, Radio externo : 30 cm , Radio interno : 21 cm. Accesorios : ⇒ Tapa bridada. ⇒ Canasta de acero inoxidable sujeta a un eje que permita sumergir y retirar la muestra de la solución osmótica.
2. Bomba de vacío	Marca : Trivac Modelo: D2A. Potencia : 10.5 Kw. Capacidad máxima : - 740 mm de Hg Voltaje de alimentación : 110 V.
3. Vacuometro	Marca : ASHCROFT Rango de medición : 0 - 760 mm de Hg desv. = 5 mm de Hg.
4. Resistencia eléctrica	Potencia : 500 W. Voltaje de alimentación : 110 V
5. Termocupla	Tipo : RTV PT 100. Rango de temperatura : 0 – 300 ° C
6. Regulador y Control de temperatura.	Tipo : T 400 Voltaje de alimentación : 110 V.
7. Recipiente para la solución osmótica	Material : acero inoxidable.

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L

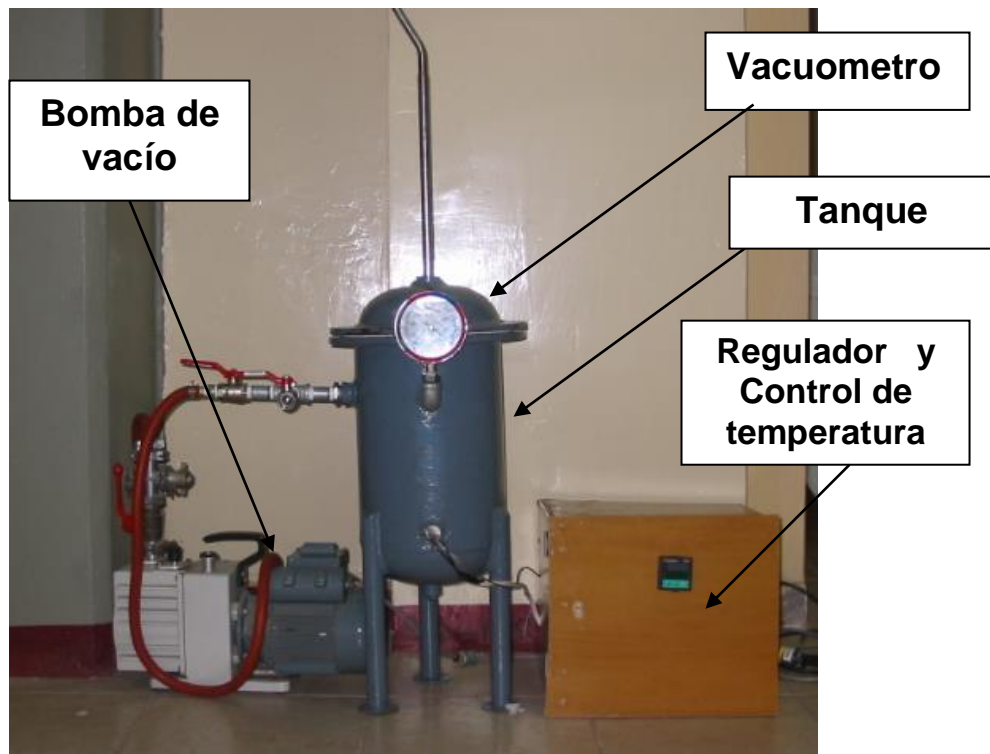


FIGURA 2. 1 EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA AL VACÍO.

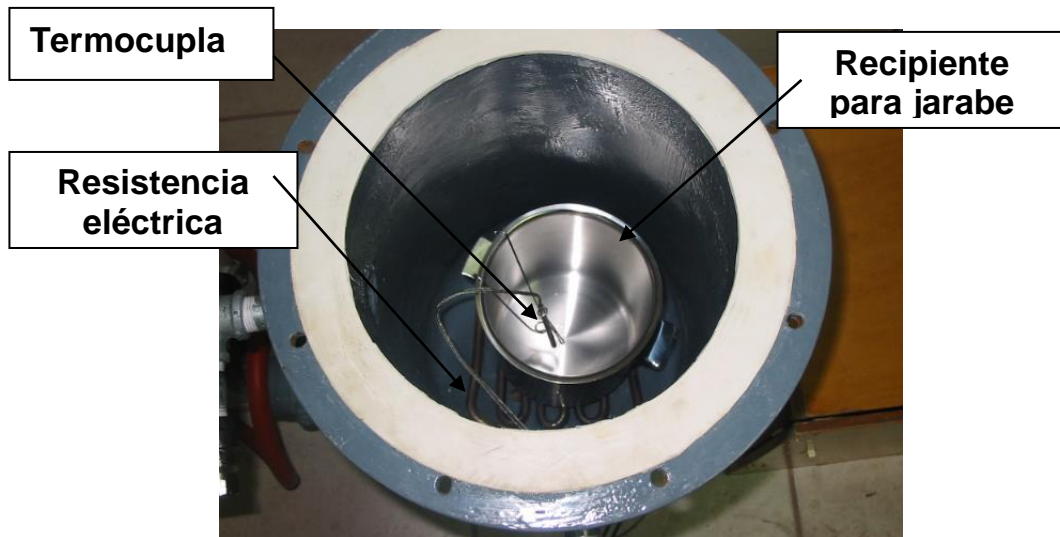


FIGURA 2. 2 INTERIOR DEL EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA AL VACÍO

2.2 Metodología de experimentación

2.2.1 Deshidratación osmótica a presión atmosférica

Definición de los parámetros de estudio.

Se realizó un estudio preliminar de la deshidratación osmótica a presión atmosférica del mango, con el fin de determinar la temperatura (T) , concentración de la solución osmótica ([]) y el tiempo de proceso (t) más idóneos, para la realización de los experimentos a presiones de vacío . Por lo que se realizaron experimentos a dos temperaturas y dos concentraciones de solución osmóticas diferentes. Manteniéndose constante la relación peso de fruta – peso de solución osmótica, la cual fue de 1 : 10.

En la tabla 7 se especifican los experimentos de deshidratación osmótica a presión atmosférica realizados.

TABLA 7
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE
MANGO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA REALIZADOS

PROCESOS DE ESTUDIO	PARÁMETRO VARIABLES		
	T (° C)	[] (° Brix)	t (min.)
Experimento 1	35	55	240
Experimento 2	35	65	240
Experimento 3	45	55	240
Experimento 4	45	65	240

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Descripción del proceso de deshidratación osmótica a presión atmosférica del mango.

El mango se lavó, peló y cortó en pedazos de forma rectangular de $1.0 \text{ cm} \pm 0.05$ x $1.0 \text{ cm} \pm 0.05$ de base y $1.1 \text{ cm} \pm 0.05$ de altura. Para luego ser pesados de acuerdo a la proporción de peso fruta – jarabe (1 : 10).

Por otro lado la solución osmótica se preparó según la concentración indicada de acuerdo al experimento a realizarse. El jarabe se pesó y se colocó en envases de vidrio, luego el jarabe se calentó en el baño maría hasta alcanzar la temperatura de trabajo. Una vez que el jarabe llegaba a la temperatura deseada, los trozos de mango se sumergían en el jarabe, fijándose mallas de plástico encima de ellos, para evitar que estos floten. Inmediatamente los recipientes que contienen la fruta – jarabe se ubicaron en la estufa, la cual se estabilizó previamente a la temperatura de experimentación. A partir de este momento el proceso de deshidratación osmótica se iniciaba, con una duración de 4 horas.

Para evaluar cada uno de los parámetros de estudio, durante los primeras 2 horas del proceso se tomaron muestras cada 10 minutos y en las dos horas siguientes cada 30 minutos. Las muestras se escurrieron y secaron con papel absorbente para retirar los restos de jarabe de la superficie. Luego a las muestras se le realizaron los análisis correspondientes.

A continuación la figura 2.3, presenta un esquema del proceso de deshidratación osmótica del mango a presión atmosférica.

Mientras que la figura 2.4 nos muestra la deshidratación osmótica realizada en los laboratorios.

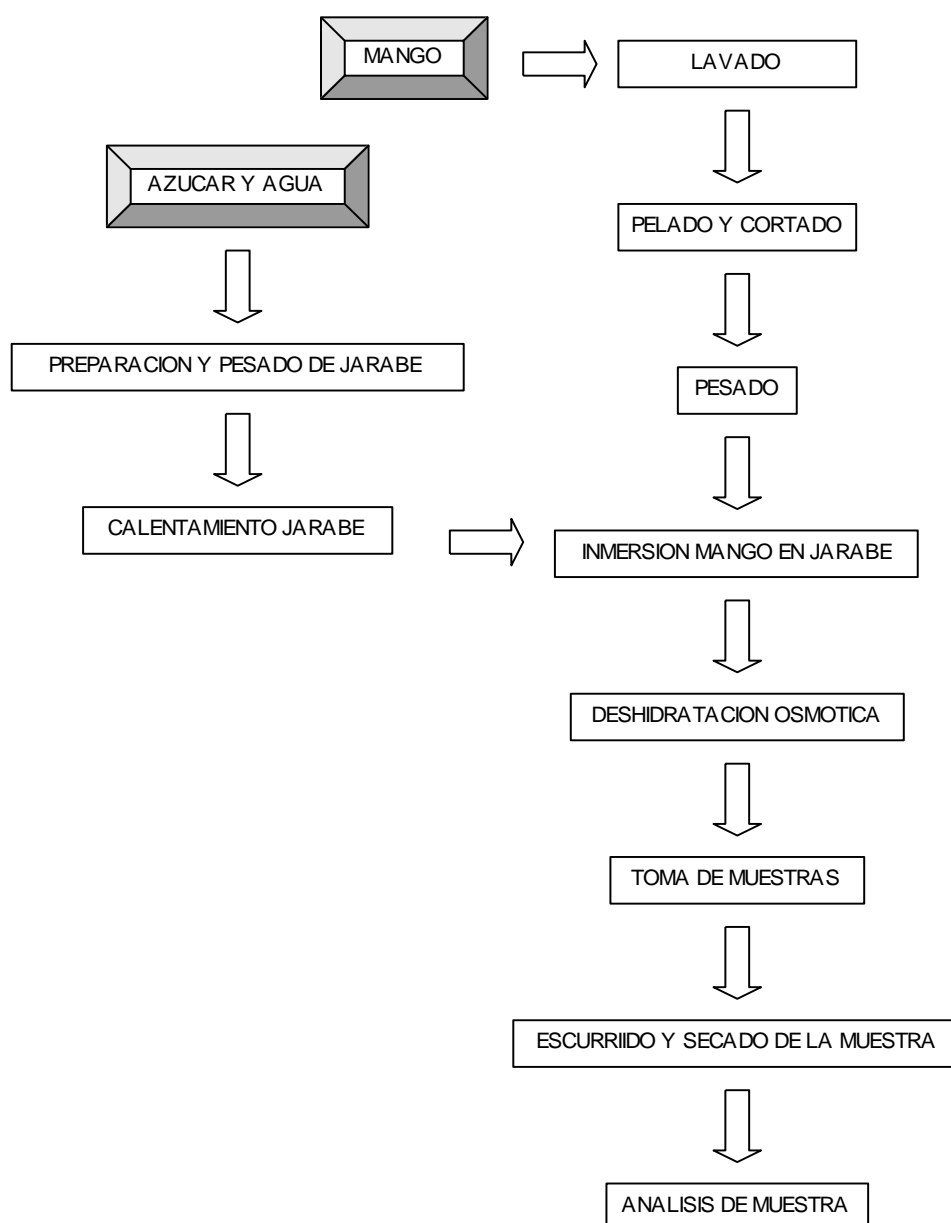


FIGURA 2.3 DIAGRAMA DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DEL MANGO A PRESIÓN ATMÓSFERICA



FIGURA 2.4 DESHIDRATACIÓN OSMOTICA DEL MANGO A PRESIÓN ATMÓSFERICA

2.2.2 Deshidratación osmótica a presión de vacío y pulso de vacío.

Los experimentos se llevaron a cabo para analizar dos diferentes tipos de procesos a presión de vacío:

Deshidratación osmótica al vacío (DOV).

Este proceso consiste en aplicar la presión de vacío durante un periodo de tiempo prolongado t_1 y luego continuar con una deshidratación osmótica a presión atmosférica durante un tiempo t_2 .

Deshidratación osmótica a vacío pulsante o pulso de vacío (DOPV) .

En este proceso se aplica un pulso de vacío durante un tiempo corto t_1 , para luego restaurar la presión atmosférica y continuar con un proceso de deshidratación osmótica a presión atmosférica durante un tiempo t_2 .

Definición de los parámetros de estudio del proceso.

Parámetros constantes

Al realizar los experimentos se mantuvieron constantes los siguientes parámetros:

- **Relación peso fruta – solución osmótica:** 1:10 peso /peso).
- **Temperatura de la solución osmótica:** 45 ° C.
- **Concentración de la solución osmótica:** 55 ° Brix.

La temperatura y la concentración de solución osmótica fueron previamente seleccionadas al analizar los resultados de deshidratación osmótica a presión atmosférica.

Parámetros variables

Los parámetros que se variaron en estos experimentos fueron: la presión y los tiempos de proceso. El tiempo t_1 representa el tiempo en que se aplicó la presión de vacío, mientras que el tiempo t_2 , es el periodo durante el cual, el mango es sometido a una deshidratación osmótica a presión atmosférica, este concluirá al completar los 120 minutos de proceso. En la tabla 8 se especifican los experimentos realizados:

TABLA 8
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA O A VACÍO Y PULSO DE VACÍO

PROCESOS DE ESTUDIO	PARÁMETROS VARIABLES		
	Presión absoluta (mbar)	t_1^{\S} (min)	t_2^{**} (min)
DOV	80	30	90
	140	30	90
DOPV 5´	80	5	115
	140	5	115
DOPV 10´	80	10	110
	140	10	110

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

[§] t_1 es el tiempo en que el proceso se realiza a presión de vacío

^{**} t_2 es el tiempo en que el proceso se realiza a presión atmosférica .

Descripción del proceso de deshidratación osmótica a presión de vacío y pulso de vacío del mango.

El mango se lavó, peló y cortó en trozos de forma rectangular de $1.0 \text{ cm} \pm 0.05$ x $1.0 \text{ cm} \pm 0.05$ de base y $1.1 \text{ cm} \pm 0.05$ de altura. Posteriormente se pesaron 60 g de fruta, para ser luego procesadas.

Se preparó un jarabe de 55° Brix. Luego 600 g de este jarabe se calentaron en baño maría hasta alcanzar la temperatura de 45°C. Los pedazos de mango se colocaron en la canasta de acero inoxidable que estaba adaptada a la tapa del tanque, colocándose una malla plástica como tapa para evitar que la fruta flote.

Cuando el jarabe llegó a la temperatura deseada, el recipiente que contenía el mismo se colocó en el tanque y se encendió el control de temperatura, para mantenerlo a la temperatura deseada. Se procedió entonces a colocar la tapa, cuidando que los pedazos de mango no se sumerjan en el jarabe. Una vez que se verificó que el equipo estaba herméticamente cerrado y que no existiera ninguna fuga, que impida que se llegue a la

presión de trabajo, se sumergieron los pedazos de mango y se aplicó la presión de vacío durante el tiempo t_1 de acuerdo al experimento que se tenía programado realizar.

Tan pronto como se completo el tiempo t_1 se cerró la válvula de vacío y se procedió a restaurar la presión atmosférica. Inmediatamente empieza a transcurrir el tiempo t_2 , donde los pedazos de mango se sometieron a una deshidratación osmótica a presión atmosférica.

Se tomaron muestras al completar el tiempo t_1 y antes de restaurar la presión atmosférica. Durante el tiempo t_2 en cambio se tomaron muestras cada 30 minutos. Las muestras se escurrían y secaban con papel absorbente, para su posterior análisis.

A continuación se presenta en la figura 2.5 un diagrama del proceso de deshidratación osmótica del mango a presión vacío y pulso de vacío.

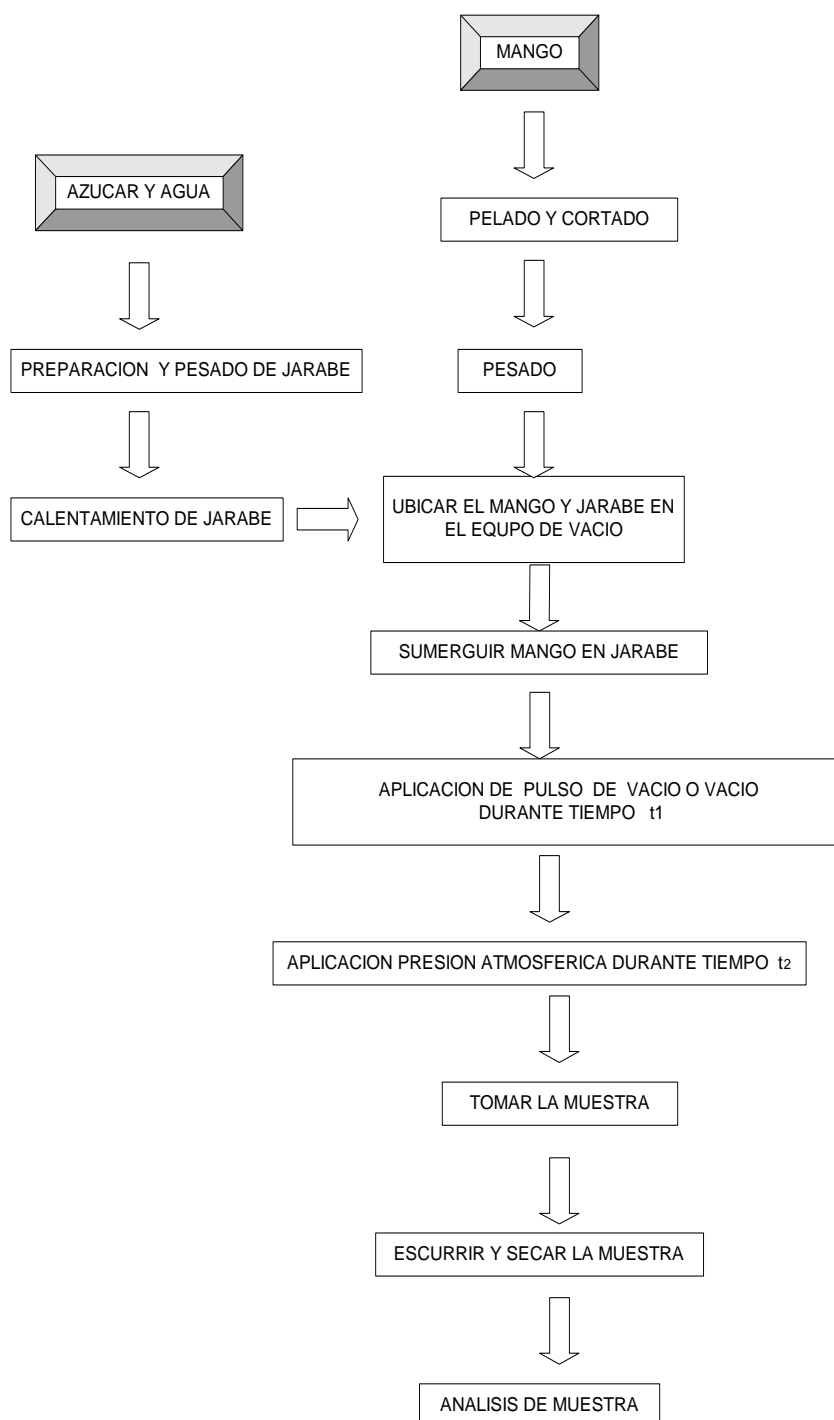


FIGURA 2.5 DIAGRAMA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DEL MANGO A PRESIÓN DE VACÍO Y PULSO DE VACÍO.

2.2.3 Métodos de evaluación de los procesos osmóticos

Para evaluar cada uno de los procesos osmóticos y determinar el más conveniente se analizó la transferencia de masa y los cambios físicos – químicos ocurridos durante los mismos.

A continuación la tabla 9, se indica los métodos de evaluación realizados para el análisis de los procesos de deshidratación osmótica a presión atmosférica.

TABLA 9
MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE PROCESOS OSMOTICOS
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Parámetros a evaluar	Método de evaluación
Cinética de la Transferencia de masa	Pérdida de agua
	Ganancia de sólidos
	Velocidades de transferencia de masa
	Coeficientes de transferencia de masa
Características físico- químicas	Reducción de peso
	Sólidos solubles
	Humedad y determinación actividad de agua
	Determinación de pH.

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

En la tabla 10 se presentan los métodos de evaluación utilizados en el los experimentos de deshidratación osmótica a presión de vacío y pulso de vacío.

TABLA 10
MÉTODOS DE EVALUACION UTILIZADOS PARA EL
PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIÓN
DE VACÍO Y PULSO DE VACÍO

Parámetros a evaluar	Método de evaluación
Cinética de la Transferencia de masa	Pérdida de agua
	Ganancia de sólidos
	Velocidades de transferencia de masa
	Coefficientes de transferencia de masa
Características físico- químicas	Reducción de peso
	Sólidos solubles
	Humedad y actividad de agua
	Deformación volumétrica de la fruta.
	Determinación de pH.
	Porosidad
	Firmeza

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Técnicas empleadas en los métodos de evaluación de los procesos osmóticos.

Cinética de la transferencia de masa

Para evaluar la cinética de transferencia de masa en los distintos procesos que se utilizaron las siguientes ecuaciones

(4):

Pérdida de agua (ΔM_w)

$$\Delta M_w = \frac{M_o X_{wo} - M_t X_{wt}}{M_o} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Ganancia de sólidos (ΔM_s)

$$\Delta M_s = \frac{M_t X_{st} - M_o X_{so}}{M_o} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

ΔM_w = Pérdida de agua (g de H₂O/ g de fruta).

ΔM_s = Ganancia de sólidos (g de sólidos/ g de fruta).

M_o = Masa inicial de la fruta (g).

M_t = Masa de la muestra deshidratada osmoticamente después de tiempo t (g).

X_{so} = Sólidos solubles iniciales en la fruta (°Brix).

X_{st} = Sólidos solubles en la muestra deshidratada osmóticamente después de un tiempo t (°Brix).

X_{wo} = Humedad inicial de la fruta (g de H₂O/g de muestra húmeda)

X_{wt} = Humedad de la fruta deshidratada osmóticamente después de un tiempo t (g de H₂O/g de muestra húmeda).

Velocidades de transferencia de masa.

Velocidad de transferencia de agua.

Para la determinación de las velocidades de transferencia de masa se efectuaron los siguientes pasos (12):

- Se determinó la cantidad de agua con las fórmulas anteriormente mencionadas.
- Luego se calculó la humedad libre que es la humedad en base seca.

- Se graficó una curva que relacione la humedad libre versus el tiempo de proceso.

- A partir de la gráfica anterior se calcularon las pendientes, los valores de estas pendientes, correspondieron a las velocidades de pérdida de agua (V_w), en determinados periodos de tiempo.

Velocidad de ganancia de sólidos.

Para determinar la velocidad de ganancia de sólidos se siguió el siguiente procedimiento (28):

- Se calculó los sólidos ganados en cada uno de los experimentos.

- Se graficó una curva que relacione los sólidos ganados versus el tiempo de proceso.

- Se determinó luego la pendiente del grafico anterior, representando este valor a la velocidad de sólidos ganados (V_{SG})

Coefficientes de difusión de agua y de sólidos.

Coefficiente de difusión del agua

Basándose en la velocidad de la transferencia de masa por difusión molecular en estado no estacionario predichas por la segunda ley de Fick, se puede determinar el coeficiente de difusión del agua desde el tejido de la fruta a la solución osmótica. Crack, et al (1975) propuso que al graficar la velocidad de difusión del agua (M) versus la raíz cuadrada del tiempo de contacto se obtiene una curva con pendiente K_w que representa el coeficiente de difusión del agua(4).

$$M = K_w \cdot (t)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

La velocidad de difusión del agua (M) se puede hallar por la siguiente expresión:

$$M = \frac{M_o \cdot X_{wo} - M_t \cdot X_{wt}}{M_o \cdot X_{wo}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

M_o = Masa inicial de la fruta (g).

M_t = Masa de la fruta deshidratada osmóticamente después de t .(g)

X_{wo} = Humedad inicial de la fruta (g de H₂O/g de fruta húmeda)

X_{wt} = Humedad de la fruta deshidratada osmóticamente después de un tiempo t (g de H₂O/g de fruta húmeda).

Coefficiente de difusión de sólidos.

El coeficiente de difusión de sólidos se calcula con la siguiente relación (4):

$$S = K_s \cdot (t)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde S es el contenido normalizado de sólidos es decir los sólidos totales a cualquier tiempo dividido para el contenido inicial de sólidos totales.

$$S = \frac{M_t \cdot X_{St}}{M_o \cdot X_{So}} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Por lo tanto graficando el contenido normalizado vs la raíz cuadrada del tiempo se obtiene una línea cuya pendiente es K_s que representa el coeficiente de difusión de los sólidos.

Evaluaciones físico – químicas

Porcentaje de pérdida de peso (ΔM).

El porcentaje de la pérdida de peso durante el proceso se calculo con la siguiente fórmula (4):

$$\Delta M = \frac{M_o - M_t}{M_o} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

ΔM = Pérdida de peso

M_o = Masa inicial de la muestra (g).

M_t = Masa de la muestra deshidratada osmoticamente después de t (g).

Sólidos solubles.

El análisis de sólidos solubles se lo utilizo como un estimador del contenido de azúcares en los pedazos de mango. La técnica más común de medición de este parámetro, esta basado en la refractometría. Los análisis se llevaron a cabo según la norma INEN 380.

Humedad

La humedad de las muestras de mango se determinaron por secado en estufa y diferencias de peso de acuerdo al método 934.06 (37.1.10) del AOC . La temperatura a la que se realizó el secado fue de 60°C.

Determinación de la actividad de agua.

La ecuación de Grover (1947) se utilizó para determinar la actividad de agua en los alimentos (19):

$$a_w * 100 = 10^4 - 10 E^0 + 0.45 (E^0)^2 \quad (\text{Ec.2.8})$$

$$E^0 = \sum (E_i / m_i) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

a_w = Actividad de agua

E_i = Valor equivalente al de la sacarosa ($E_i = 1$ para sacarosa) para los diferentes ingredientes;

m_i = Contenido de humedad del ingrediente en gramos de agua por gramos de ingrediente.

pH .

Se utilizó un método colorimétrico para la determinación del pH. Se utilizaron tirillas indicadoras de pH, la cual dependiendo del pH de la disolución, cambiará de color. Determinándose el valor de pH al que se encontraba la muestra, al comparar la tirilla con una gráfica de colores estándar (24).

Además de estas evaluaciones, para el estudio específico de la deshidratación osmótica a presión de vacío se realizaron las siguientes determinaciones:

Deformación volumétrica (γ)

Para determinar la deformación volumétrica, es decir el efecto del fenómeno deformación relajación, se midió el ancho, largo y espesor de los pedazos de mango usando un vernier de acero inoxidable antes y después de la deshidratación osmótica a presión de vacío, y pulso de vacío. Para luego aplicar la siguiente fórmula (27):

$$\gamma = \frac{V_f - V_0}{V_0} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

γ = Deformación volumétrica (cm^3)

V_o = Volumen inicial (cm^3)

V_f = Volumen final (cm^3)

Determinación de la porosidad efectiva del mango

La porosidad efectiva (ϵ_e), esta definida como la fracción volumétrica de gas en los tejidos de la fruta en comparación con el volumen total de la fruta. La transferencia de masa a través de la fase alimento – solución depende de la naturaleza de la fase de contacto o de la interacción de las dos fases. El gas dentro del tejido de la fruta afecta la interacción del alimento- solución osmótica debido a la obstrucción del camino para que ocurra la transferencia de masa. Por lo tanto es importante conocer la porosidad efectiva, ya que este ejerce una influencia sobre la transferencia de masa (4,5,6).

La porosidad efectiva de las frutas, puede variar en frutas de una misma variedad, de acuerdo al grado de madurez y condiciones de crecimiento entre otros factores. Por lo tanto el mango que de la variedad Tommy Atkins producidos en nuestro país tendrá un determinado coeficiente de porosidad (4,5,6).

Pedro Fito (1992) estableció un procedimiento para medir la porosidad y el cual fue empleado en este estudio y se detallará a continuación (4):

1. El mango se lavó, peló y cortó en pedazos de forma rectangular de $1.0 \text{ cm} \pm 0.05 \times 1.0 \text{ cm} \pm 0.05$ base y $1.1 \text{ cm} \pm 0.05$ de altura.
2. Una solución isotónica fue preparada de acuerdo a la actividad de agua de la muestra fresca de mango.
3. Para guardar la relación peso fruta-solución osmótica que para este experimento fue (1 : 10), se pesaron 35 g de trozos de mango y 350 g de la solución isotónica. De los gramos de fruta pesados se separaron 3 pedazos de mango, a los cuales se les tomó peso y volumen.
4. La solución isotónica se colocó en un recipiente y se ubicó en el equipo utilizado para la deshidratación osmótica al vacío.

5. Luego se sumergieron las muestras de mango en la solución isotónica y se aplicó una presión de vacío por un tiempo de 2 minutos. Luego se restauró la presión atmosférica y se retiraron los trozos de mango de la solución isotónica.

6. A las tres muestras previamente identificadas se les tomó el peso final y se procedió a realizar los cálculos.

Este experimento se remitió a seis diferentes presiones para construir una curva de porosidad vs presión absoluta. Las presiones absolutas a las que se trabajó fueron las siguientes: 80, 100, 200, 400, 600 y 800 mbar.

Al finalizar los tratamientos de vacío, el gas de los espacios intracelulares es removido y reemplazado por la solución isotónica.

Luego se determina la fracción volumétrica total del alimento ocupado por la solución (X_v) mediante la ecuación 1.25:

$$X_v = \frac{(M_f - M_o)}{\rho V_o} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Se utilizó la ecuación 1.26 y 1.27 para encontrar una relación que permite determinar la porosidad efectiva del mango:

$$X_v = \varepsilon_e \left(1 - \frac{1}{r} \right) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$r = \frac{P_t}{P_{atm}} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:

P_{atm} = 1030 mbar.

P_t = Presión absoluta en cada tratamiento a un tiempo t (mbar).

Entonces se graficó la fracción volumétrica total del alimento ocupado por la solución (X_v) versus el término $(1-1/r)$, y se determinó la pendiente, hallando de esta manera la porosidad efectiva del mango.

Color

Para la medición de color se utilizó un catalogo de pigmentos alimenticios constituido por múltiples patrones de colores, de los cuales se determinó las distintas tonalidades que puede presentar el mango a largo de su maduración y del proceso. Para posteriormente comparar con las tonalidades obtenidas

después de los experimentos. En el anexo A se presenta el patrón de color utilizada en los experimentos.

Firmeza

La firmeza es fundamental para la aceptabilidad de las frutas y su posible almacenamiento. Una prueba objetiva para determinar la firmeza de una fruta se la realiza mediante el uso del penetrómetro (18).

La determinación de la firmeza de una fruta por medio del penetrómetro se basa en la presión necesaria para insertar un puntal de tamaño específico en la pulpa de la fruta en un tiempo determinado (18).

Como no se contaba con este equipo en la universidad, se procedió al diseño y adaptación de un penetrómetro para alimentos. Para ello se utilizaron los siguientes materiales:

- Medidor de deformación con indicador de carátula John Bull, desv.= 0.01 mm.
- Soporte de aluminio.
- Varilla de aluminio con punta en forma de cono.

Para la medición de la firmeza se siguió la siguiente técnica, (18):

1. La punta en forma de cono C es colocada sobre la superficie S de la fruta, ver la figura 2.6.
2. Se coloca en cero el medidor de deformación.
3. Se descarga el cono dentro del alimento en un tiempo de 5 segundos.
4. Se determina la profundidad de deformación con el medidor de deformación D ver la figura 2.6.

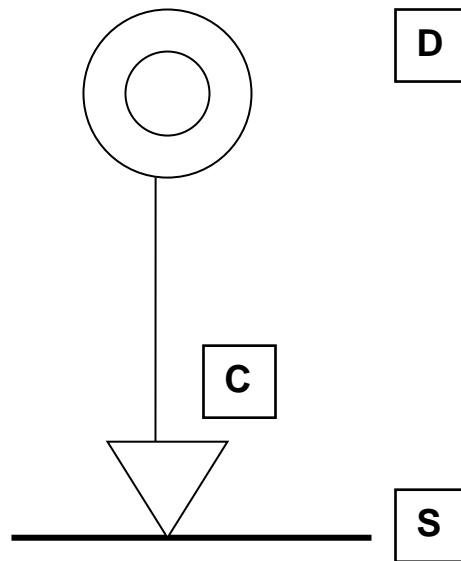


FIGURA 2.6 ESQUEMA PARA LA MEDICIÓN DE TEXTURA DE LAS FRUTAS

5. Se calcula la presión con la ecuación que se presenta a continuación :

$$\tau_0 = \frac{gm}{P^2 \tan^2(1/2\alpha_c)} \quad (\text{Ec.2.14})$$

Donde:

P = Es la profundidad de penetración después de 5 s.

g = Gravedad

m = Masa en Kg. del cono

α_c = ángulo del cono.

En la figura 2.7 se presenta el penetrómetro, elaborado para realizar la medición:



FIGURA 2.7 PENETRÓMETRO PARA LA MEDICIÓN DE TEXTURA DE LAS FRUTAS

CAPITULO 3

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 Deshidratación osmótica de mango a presión atmosférica.

Se estudio el proceso de deshidratación osmótica de mango a presión atmosférica; con el fin de determinar la temperatura y la concentración de la solución de sacarosa; que nos permitan obtener los mejores resultados. Estas permanecieron constantes en los experimentos de deshidratación osmótica a presiones de vacío. Finalmente se comparará los resultados conseguidos en cada uno de los procesos y se determinará las ventajas y desventajas de la aplicación de vacío versus la presión atmosférica.

3.1.1 Cinética de la transferencia de masa.

La cinética de la deshidratación osmótica se estimó determinando la cantidad de pérdida de agua y ganancia de sólidos, así como la rapidez de eliminación de agua y velocidad de ganancia de sólidos.

Pérdidas de agua y Ganancia de sólidos

Como se mencionó anteriormente, los fenómenos más importantes que se presentan en la deshidratación osmótica es la remoción de agua del mango junto con el ingreso de sólidos del jarabe al interior del mango (1,25,29,31). A continuación se analizará la influencia de la temperatura y la concentración de la solución de sacarosa sobre estos fenómenos.

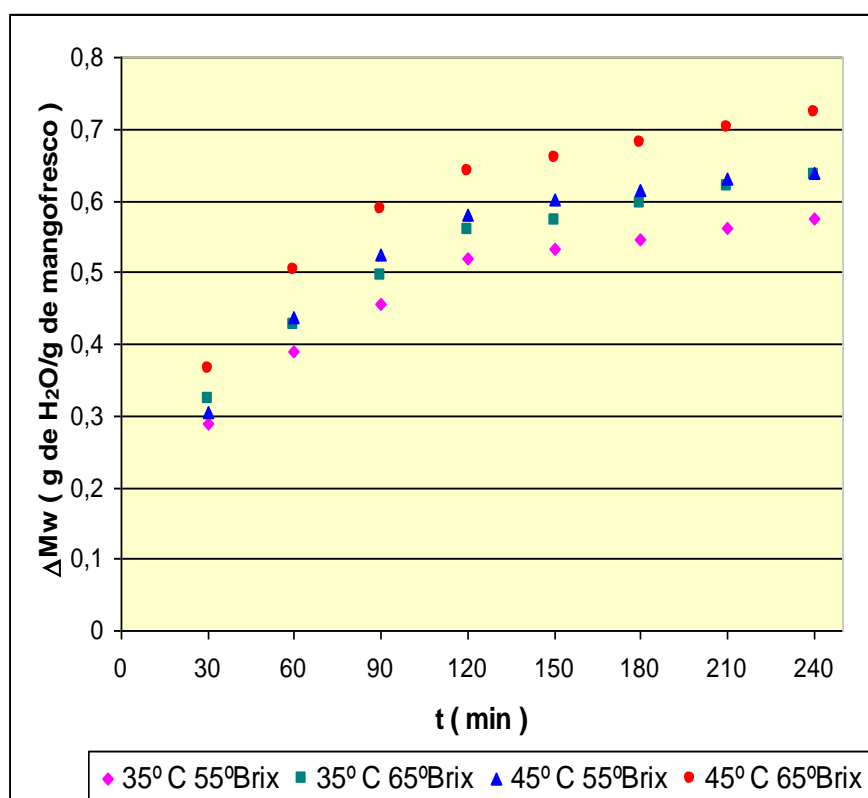
Pérdidas de agua

Mediante la ecuación 2.1 se determinó la pérdida de agua para cada uno de los experimentos realizados a presión atmosférica, las cuales se ilustran en la figura 3.1

El experimento realizado a 45°C-65°Brix; es el que presenta las mayores pérdidas de agua, ya que después de una hora de proceso, el mango había perdido el 50% de su contenido de agua. Mientras que el experimento realizado a 35°C-55°Brix, alcanzó el 50 % de disminución de agua, recién a las dos horas de proceso. Se puede determinar de esta manera, que las pérdidas de agua se incrementan cuando se aumentan las temperaturas de proceso. Se observa además que mientras más alta es la concentración del jarabe de sacarosa; mayores serán

las pérdidas de agua del mango. Esto se debe a que una mayor concentración de sacarosa, representa una menor actividad de agua de la solución, produciéndose entonces una gran diferencia en las actividades de agua entre el mango y la solución, generando una mayor la transferencia de agua fuera del mango hacia la solución (1, 25,27,29,31).

FIGURA 3.1
PÉRDIDAS DE AGUA EN LOS EXPERIMENTOS DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION ATMÓSFERICA
DEL MANGO



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Ganancia de sólidos.

En la figura 3.2 se presenta los sólidos ganados en cada uno de los experimentos realizados, los cuales fueron determinados por la ecuación 2.2.

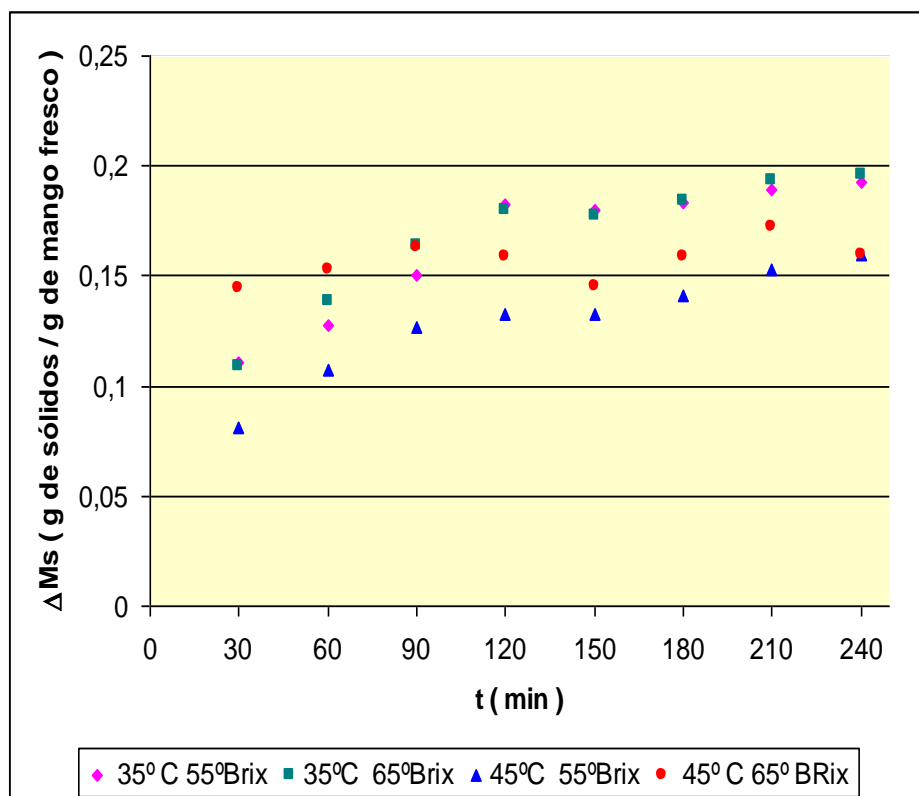
La incorporación de sacarosa al mango, proporciona ciertas ventajas como es la reducción de pardeamientos, por ser un inhibidor eficaz de la polifenoloxidasas y el aumento de la retención de compuestos volátiles, que benefician a la calidad organoléptica final del producto (1,27). Sin embargo el incremento excesivo de la sacarosa puede alterar el sabor característico del mango; afectando las características sensoriales del mismo (31).

La deshidratación osmótica se basa en una remoción significativa de agua con la menor entrada de solutos al alimento, diferenciándose de esta manera de otras técnicas como el curado de la carne y la salazón de queso (23). Por lo tanto respecto a la ganancia de sólidos, lo que se busca al comparar los distintos procesos de deshidratación osmótica, es establecer el experimento, donde se presente el menor incremento de sólidos en el mango. Distinguiéndose que el experimento realizado a

45°C y 55°Brix, fue el que presento la menor ganancia de sólidos. Al comparar el efecto de la concentración de la solución, sin tomar en cuenta la temperatura pudo observar que mientras mayor es la concentración del jarabe de sacarosa, mayor es el incremento de sólidos del mango. En cuanto a la influencia de la temperatura se pudo notar, que después de las dos horas de proceso; los experimentos realizados a las temperatura de 35°C, siguen ganando sólidos de manera progresiva, mientras que los experimentos realizados a la temperatura de 45°C, a las dos horas, como las pérdidas de agua fueron mayores la diferencia de concentración disminuyó, lo que determinó que las ganancias de sólidos fueran menores e incluso se tienda al pseudo-equilibrio en los procesos realizados a esta temperatura.

.

FIGURA 3.2
GANANCIA DE SÓLIDOS EN LOS EXPERIMENTOS DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION ATMÓSFERICA
DEL MANGO



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L

Velocidad de pérdida de agua y velocidad de ganancia de sólidos.

Velocidades de pérdida de agua.

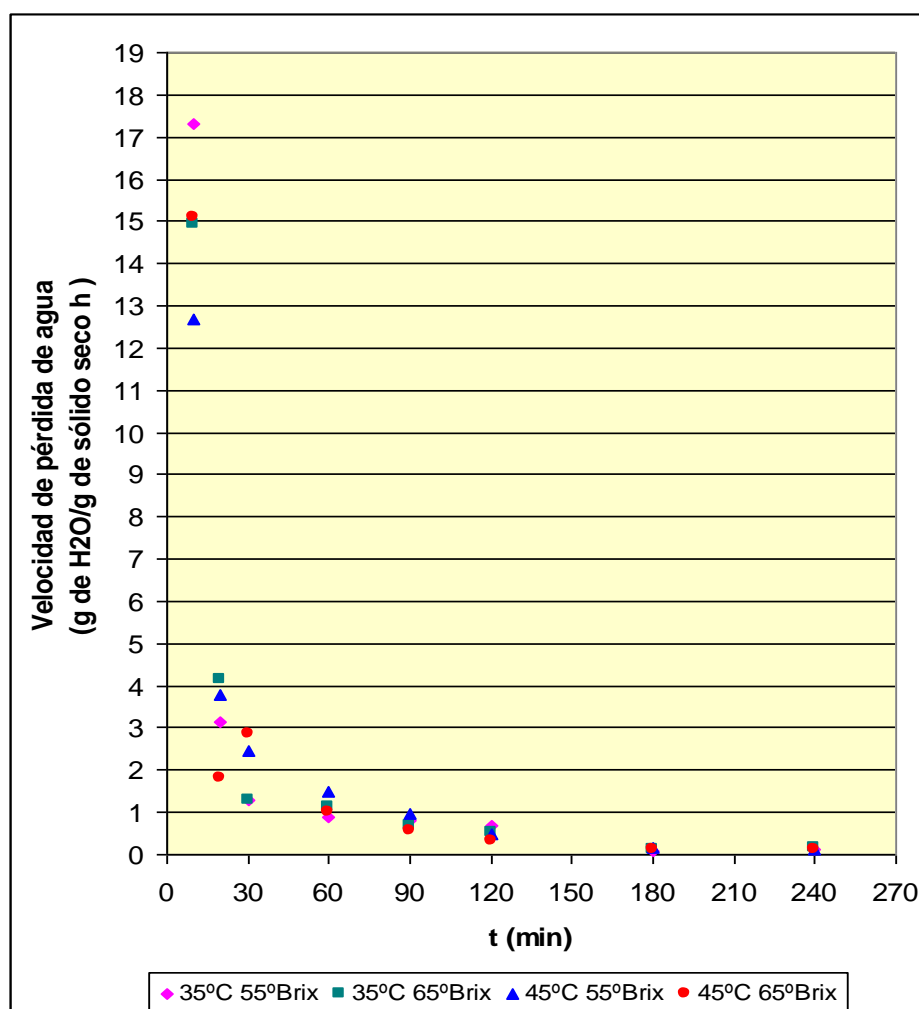
La figura 3.3 presenta las velocidades de pérdida de agua para cada uno de los experimentos en función del tiempo, estas

velocidades se obtuvieron al calcular las pendientes del grafico de humedad libre vs tiempo que se presentan en el anexo B, mientras que una tabla con los valores de las velocidades para cada una de las pruebas realizadas se expone en el anexo C.

Al comparar los resultados de la figura 3.3 se puede apreciar que las mayores velocidades de eliminación de agua se presentan en los primeros 10 minutos del proceso. Siendo el experimento realizado a 35°C-55° Brix, el que presentó la mayor velocidad en este periodo de tiempo, pero al transcurrir los experimentos estas velocidades van decreciendo drásticamente, estableciéndose una diferencia con el secado convencional, donde se aprecian dos periodos uno de velocidad constante y otro de velocidad decreciente. Ya que en el secado convencional esto se debe a que la deshidratación osmótica el agua no sufre un cambio de fase, sino que más bien es un método de deshidratación no térmico que se basa en la diferencia de potencial químico (1,26). Se puede indicar además que independientemente de la temperatura y la concentración de solución osmótica al final del proceso, todos los experimentos presentaron velocidades de pérdidas de agua muy similares, lo que nos permitió deducir que

después de cuatro horas de tratamiento, el proceso de osmosis tendió al cuasi-equilibrio en el mango.

FIGURA 3.3
VELOCIDADES DE PÉRDIDA DE AGUA EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESION ATMÓSFERICA DEL MANGO



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

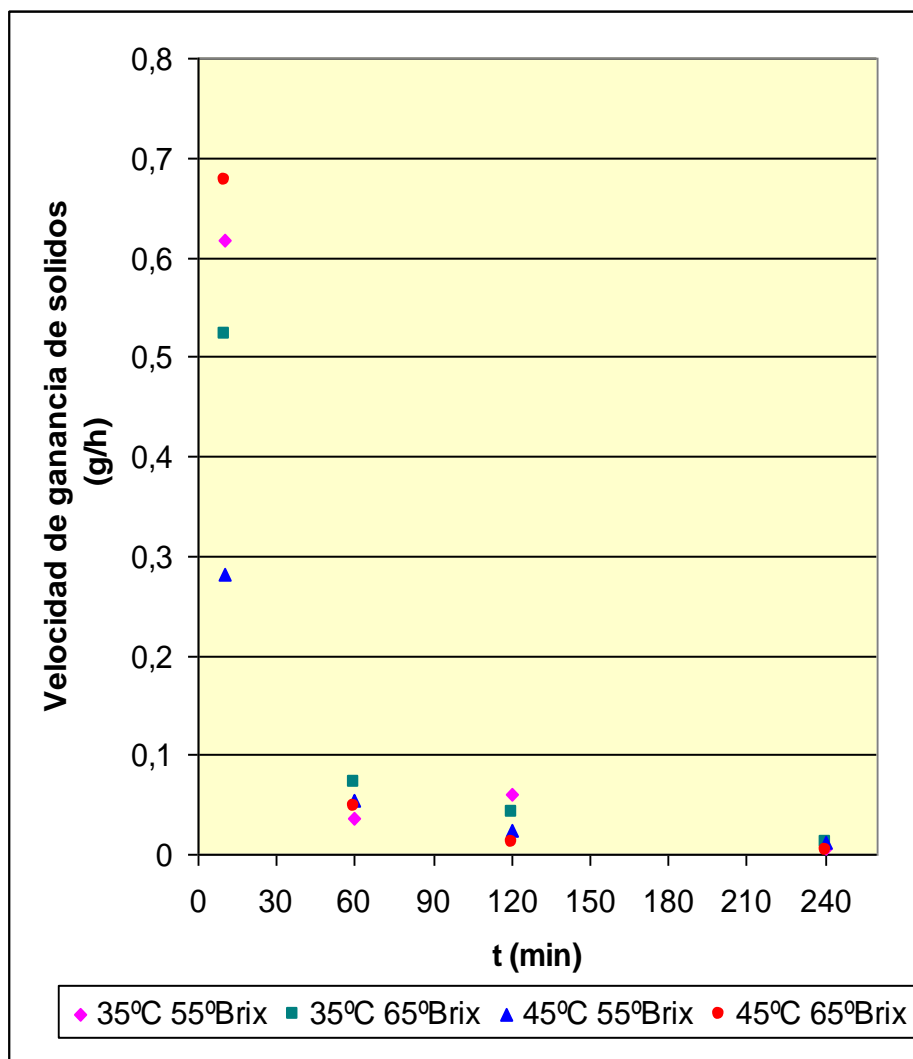
Velocidades de ganancia de sólidos

A continuación se presenta la figura 3.4, que muestra las velocidades de ganancia de sólidos en función del tiempo. Al comparar las figuras 3.3 y 3.4 se aprecia que estas velocidades de ganancia de sólidos presentan valores muy pequeños comparados con las velocidades de pérdidas de agua, por lo tanto se demuestra que las moléculas de sacarosa tienen una difusividad mucho más baja a través de la membrana celular del mango, que las moléculas de agua, lo que permite que se produzca una gran remoción de agua, con una mínima absorción de sacarosa. (4, 7,25 ,27).

Por otro lado, al comparar las velocidades de ganancia de sólidos en los experimentos realizados, es importante determinar las condiciones bajo las cuales se presentan las menores velocidades, apreciándose en el anexo D, donde se presentan los valores de las velocidades, que el experimento realizado a 45°C-55°Brix, se obtienen las menores velocidades de ganancia de sólidos.

Se advierte además que las velocidades decrecen considerablemente a medida que transcurre el proceso, esto se debe a que la solución osmótica va disminuyendo su concentración, pues el agua que pierde el mango va diluyendo el jarabe, tendiéndose al equilibrio, por lo tanto disminuyendo los mecanismos de transferencia de masa (3,4, 7).

FIGURA 3.4
VELOCIDADES DE GANANCIA DE SÓLIOS EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESION ATMÓSFERICA DEL MANGO



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L

Resumiendo se podría decir que las mayores velocidades de pérdida de agua y de ganancia de sólidos se producen en los momentos iniciales del proceso, que es cuando existe la mayor diferencia de concentraciones entre el mango y el jarabe de sacarosa. Después de dos horas las velocidades de pérdidas de agua y ganancia de sólidos decrecen drásticamente y esto se puede atribuir a que hay una disminución en el gradiente de concentraciones y a los cambios estructurales que se presentan en el tejido retardando la difusión.(3,26).

Coefficientes de transferencia de masa

Otro parámetro relacionado con la transferencia de masa en la deshidratación osmótica son los coeficientes globales de transferencia de masa, los cuales están relacionados con la dificultad para el transporte de un determinado componente entre dos fases no miscibles (4). En la tabla 11 se presentan los valores de los coeficientes de difusión del agua (K_w) y de los coeficientes de difusión de sólidos (K_{SG}), los cuales fueron calculados a partir de las pendientes de los gráficos de los anexos E y anexo F, respectivamente.

TABLA 11
COEFICIENTES DE DIFUSION DE AGUA Y DE SÓLIDOS
PARA CADA UNO DE LOS EXPERIMENTOS DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION ATMOSFERICA
DE MANGO

Experimentos	K_w	R^2	K_{SG}	R^2
35 °C 55° Brix	0.0392	0.9323	0.052	0.9289
35 °C 65° Brix	0.0424	0.9487	0.051	0.9172
45 °C 55° Brix	0.0456	0.9194	0.042	0.9488
45 °C 65° Brix	0.0514	0.9250	0.0079	0.156

Elaborado por: Elizabeth Huayamave

Al comparar los coeficientes de difusión del agua de los distintos ensayos realizados, el proceso más conveniente es el que presente el mayor coeficiente K_w , ya que al obtener su inverso sería el que representaría la menor resistencia a la transferencia de agua. Por lo tanto los procesos a 45 °C son los que tienen los mayores K_w , por lo tanto ofrecen menos resistencia a la difusión del agua.

En lo que se refiere a los coeficientes de difusión de sólidos, lo que se busca es el proceso que ofrezca mayor resistencia a la difusión de sólidos, por lo que conviene el menor coeficiente K_{SG} , siendo este el proceso de 45°C-55°Brix, se descartándose el de 45°C-65°Brix, porque la regresión lineal no es tan precisa con un $R^2 = 0.156$.

3.1.2 Evaluaciones físico – químicas

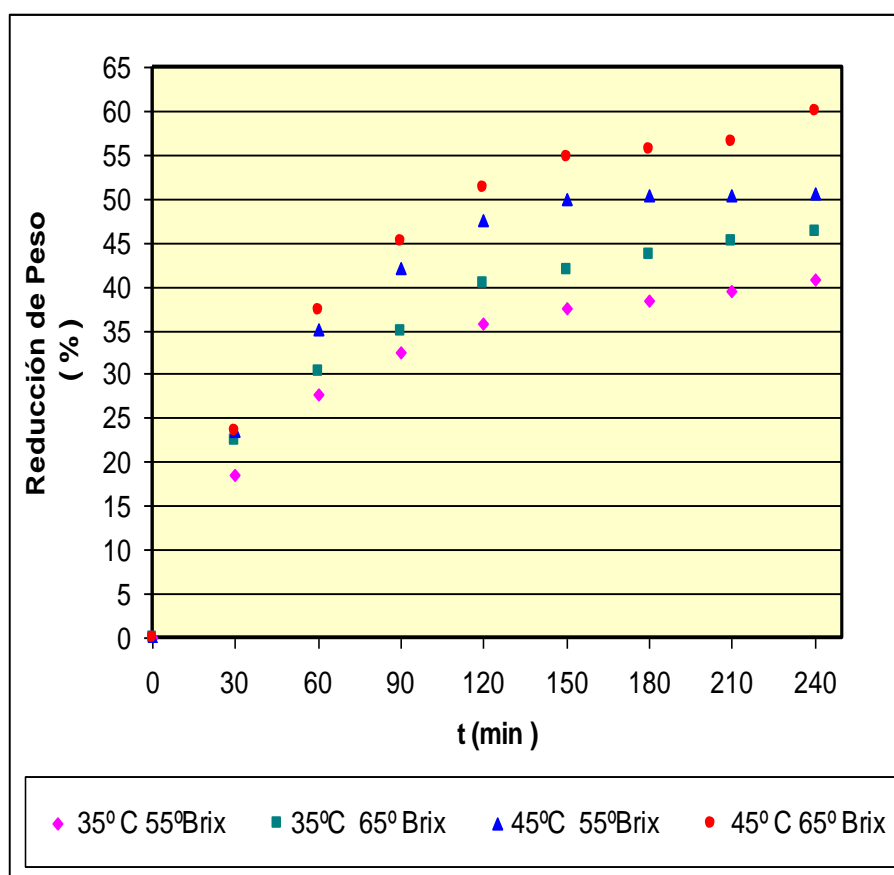
Porcentaje de reducción de peso

La pérdida de peso se toma en cuenta como una variable importante en la eficiencia del proceso de deshidratación osmótica. Generalmente el proceso de deshidratación osmótica se lleva a cabo hasta alcanzar un reducción de peso del 50% (7,31).

Al comparar los porcentajes de pérdida de peso en cada uno de los experimentos, que se presentan en la figura 3.5; se determinó que la prueba realizada a 45°C-65°Brix, después de la hora de proceso presento un porcentaje de perdida de peso del 50 %, mientras que el proceso a 45°C-55°Brix a los 150 minutos alcanzo este porcentaje. Sin embargo, los experimentos realizados a la temperatura de 35° C, aun después de 4 horas

de proceso, no alcanzaron el 50 % de pérdida de peso. Apreciando entonces que existe un mayor porcentaje de pérdida de peso a mayores temperaturas y a altas concentraciones de jarabe de sacarosa.

FIGURA 3.5
PORCENTAJES DE PÉRDIDA DE PESO EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESION ATMÓSFERICA DEL MANGO



Elaborado por : Elizabeth Huayamave L

Actividad de agua.

La figura 3.6 muestra las actividades de agua presentadas por el mango, en los distintos procesos de deshidratación osmótica a presión atmosférica; estas fueron determinadas a partir de la ecuación 2.8, la cual esta relacionada con el contenido de humedad y porcentajes de sacarosa ganados por el mango, y cuyos resultados se presentan en los anexos G y H respectivamente.

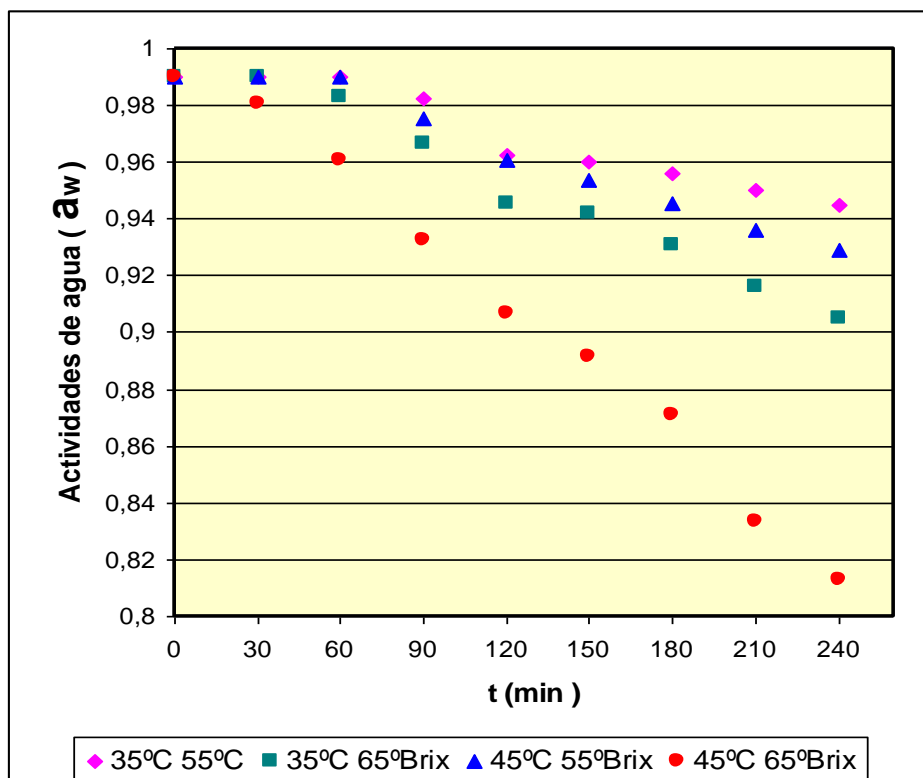
Se puede apreciar que al someter al mango a un proceso de deshidratación osmótica se produce una disminución considerable de la actividad de agua. Esta se debe principalmente a la pérdida de agua y a la sacarosa ganada por el mango durante el proceso. Al reducirse la actividad de agua, menor cantidad de agua se encuentra disponible para procesos de deterioro natural o para el desarrollo de microorganismos, proporcionando así una mayor estabilidad al mango (1,27,31).

Se ha determinado que la mayoría de microorganismos crecen más rápidamente a niveles de actividad de agua entre 0.995 a 0.98 (16,26). A valores inferiores a estos, la velocidad de crecimiento y la población estacionaria o la masa celular final

disminuye y la fase de latencia aumenta (16). El anexo I presenta una tabla, donde se indica el efecto de la reducción de la actividad de agua en la supervivencia de los microorganismos. Por consiguiente al comparar las actividades de agua alcanzadas en los distintos experimentos, se estableció que con dos horas de de deshidratación osmótica, el mango alcanza actividades de agua por debajo de 0.97, asegurando de esta manera una reducción de la acción microbiana.

Se pudo distinguir además que a mayores concentraciones de sacarosa; más rápida es la disminución de la actividad de agua, debido a que la sacarosa, es considerado uno de los depresores de actividad de agua, mas eficientes.(1,28)

FIGURA 3.6
ACTIVIDADES DE AGUA EN LOS EXPERIMENTOS DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION ATMÓSFERICA
DEL MANGO



Elaborado por Elizabeth Huayamave L.

Variación de pH.

Al realizar las mediciones de pH cada media hora, se observó que estos no presentaban una variación significativa manteniéndose en $\text{pH} = 4$ en cada uno de los experimentos realizados.

Selección de los parámetros de deshidratación osmótica para los experimentos al vacío.

Después de haber comparado los resultados correspondientes a las pérdidas de agua, ganancia de sólidos y propiedades físicas químicas, se determinó que el experimento realizado a la temperatura de 45°C y a una concentración de solución osmótica de 55°Brix, fue el que presentó las mayores pérdidas de agua y menores ganancia de sólidos en un periodo de tiempo correspondiente a las dos horas, sin una alteración excesiva de sus propiedades físico-químicas. Por lo tanto los experimentos de deshidratación osmótica a presiones de vacío se realizaron a una temperatura de 45°C y a una concentración osmótica de 55° Brix.

3.2 Deshidratación osmótica de mango a vacío y pulso de vacío.

3.2.1 Cinética de la transferencia de masa.

Perdidas de agua y ganancia de sólidos.

A continuación se presentan las figuras 3.7 y 3.8 en las cuales se contrastan la pérdida de agua (ΔM_w) y ganancia de sólidos (ΔM_s) para cada uno de los tratamientos de deshidratación osmótica de mango realizados a presión de vacío (DOV) y pulso de vacío (DOPV), a las presiones absolutas de 140 mbar y 80

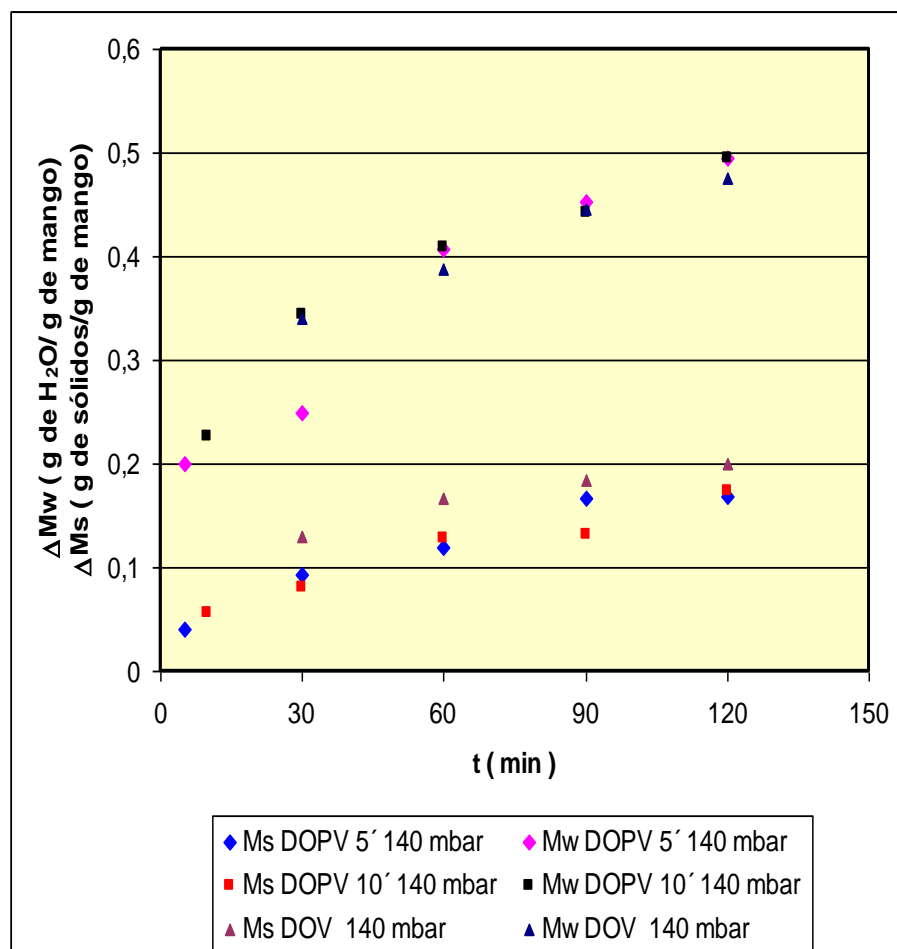
mbar respectivamente. En ambos gráficos se observa, que la pérdida de agua es mayor que la ganancia de sólidos, comportamiento que también fue advertido en la deshidratación osmótica a presión atmosférica. Esta diferencia se debe a que las moléculas de sacarosa presentan un tamaño mucho mayor a las moléculas de agua; que no le permiten difundirse tan fácilmente a través de la membrana celular del mango, determinando así que el pérdida de agua sea la primera en alcanzar el equilibrio osmótico (4,7,28).

Efecto del tiempo de aplicación de la presión de vacío.

Al contrastar el efecto del tiempo de aplicación de la presión sobre la reducción de agua en el mango, en las figuras 3.7 y 3.8, se pudo apreciar que después de dos horas de tratamiento, las pérdidas de agua son las mismas, cuando se aplica la misma presión de vacío por cinco, diez o treinta minutos. Este comportamiento se puede explicar analizando el efecto que ejerce el mecanismo hidrodinámico (HDM) y el fenómeno de deformación (DRP), los cuales se presentan al sumergir estructuras porosas en líquidos bajo condiciones de vacío (3,5,6,31). Al aplicar vacío se produce una expansión del gas ocluido en los poros del mango, provocando que fluye hacia el

exterior, y que la matriz sólida del poro, se deforme (DRP). La salida del gas cesa, una vez que las presiones se igualan. El sistema se mantiene a esta presión de equilibrio, que es la presión de trabajo por un cierto tiempo, entonces ocurre el HDM, como consecuencia del gradiente de presiones entre la presión interna del gas atrapado en los poros y la presión del sistema, provocando que los espacios intercelulares se llenen parcialmente de líquido. Cuando se reestablece la presión atmosférica al sistema se presenta nuevamente el mecanismo hidrodinámico (HDM), que dada la gran diferencia entre la presión interna y externa que se produce, permite el ingreso de un volumen de solución de sacarosa mucho mayor al anterior al poro del alimento, aumentando de esta manera la superficie de interfase entre el mango y el jarabe de sacarosa, favoreciendo la transferencia de masa e incrementando las pérdidas de agua. (3,4,5,6,31). Es decir que el efecto más importante sobre la transferencia de masa se consigue cuando se reestablece el sistema a la presión atmosférica, por lo tanto no influye significativamente el tiempo en que se aplica la presión de vacío sobre las pérdidas de agua.

FIGURA 3.7
PÉRDIDAS DE AGUA Y GANANCIA DE SÓLIDOS EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESION DE 140 MBAR.



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Por lo tanto obtendremos los mismos resultados en pérdidas de agua aplicando un pulso de vacío, que una presión de vacío por un tiempo considerable, obteniendo de esta manera un ahorro considerable de energía (3,4,5,6,31).

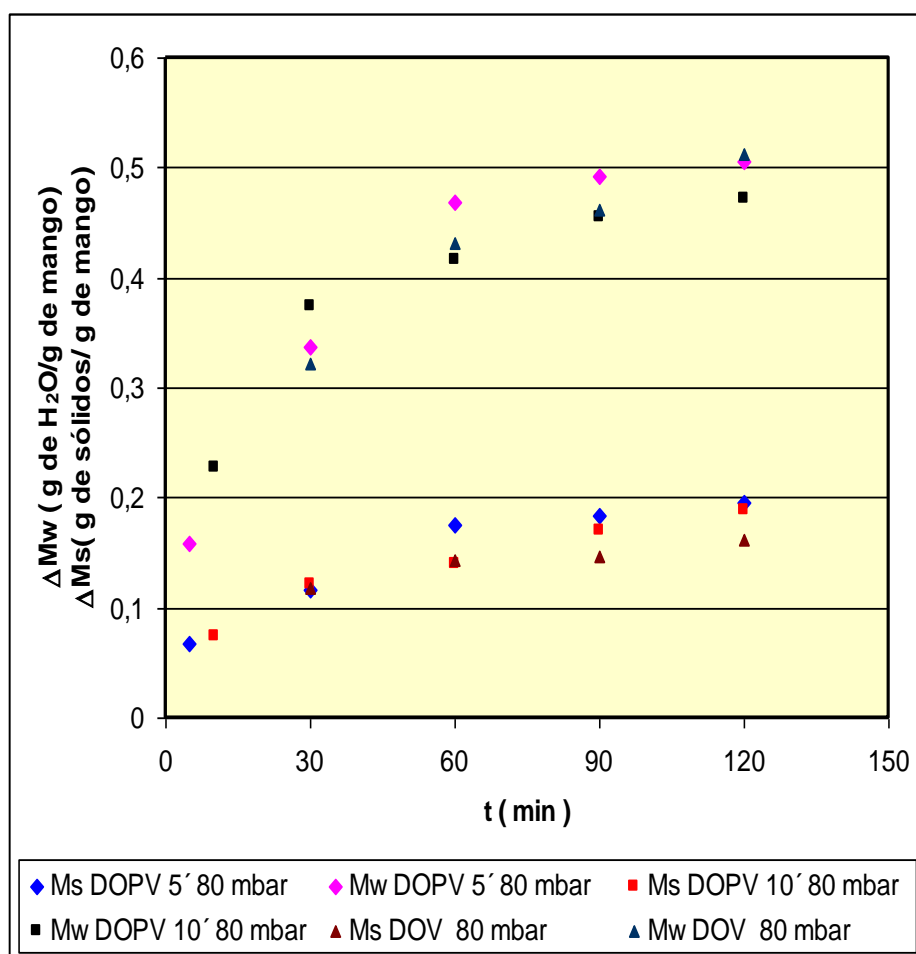
En cuanto a la ganancia de sólidos el efecto del tiempo de aplicación de la presión de vacío, tampoco fue significativo, ya que el incremento de sólidos a los distintos tiempos, presento valores muy similares.(4,5,6,7).

Efecto de la presión de vacío.

Al comparar los resultados entre las presiones, observamos que a la presión absoluta de 80 mbar, se obtienen mayores pérdidas de agua, debido a que la diferencia de presiones es mayor al reestablecer la presión atmosférica, produciendo un mayor efecto del mecanismo hidrodinámico. Por consiguiente a mayores presiones de vacío, mayores perdidas de agua, esto se explicaría dado que al aplicar mayor vacío el volumen del gas del poro se expande mas y se produce una mayor diferencia de presiones, contribuyendo a que ingrese mayor cantidad de jarabe de sacarosa y se aumente considerablemente el área de contacto, favoreciendo a la perdidas de agua (3, 4, 5, 6 , 7, 25).

Sin embargo con respecto a la ganancia de sólidos no hay una diferencia representativa al contrastar los resultados obtenidos a las dos presiones. (5,6)

FIGURA 3.8
PÉRDIDAS DE AGUA Y GANANCIA DE SÓLIDOS EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESION DE 80 MBAR.



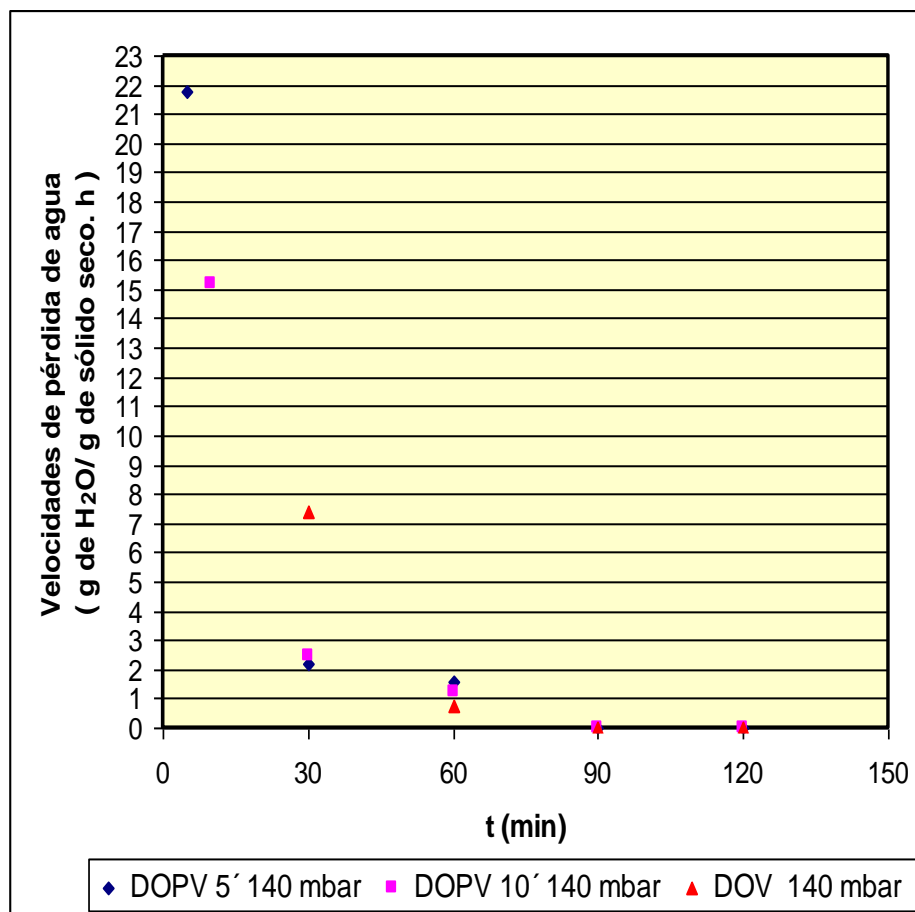
Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Velocidades de pérdida de agua.

Efecto del tiempo de aplicación de la presión de vacío.

En la figura 3.9 se muestra las velocidades de pérdidas de agua en función del tiempo, obtenidas a la presión absoluta de 140 mbar. Apreciándose que al aplicar un pulso de vacío durante cinco minutos (DOPV5'), se presenta la mayor velocidad de pérdida de agua, en comparación con el pulso de 10 minutos (DOPV10'), pero a las dos horas de proceso, las velocidades de los dos pulsos se igualan. En el proceso en que se aplicó la presión de vacío durante treinta minutos (DOV), la velocidad de pérdida de agua presentó un valor mayor a la media hora del proceso en relación a las presentadas por los otros dos tratamientos, pero esto se debe a que recién en este instante se produce el mayor ingreso de la solución al poro debido a la diferencia de presiones aplicadas, produciéndose la mayor transferencia de masa. Pero después de las dos horas este es el tratamiento que presenta la menor velocidad de pérdida de agua.

FIGURA 3.9
VELOCIDADES DE PÉRDIDA DE AGUA EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESION DE 140 MBAR.



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

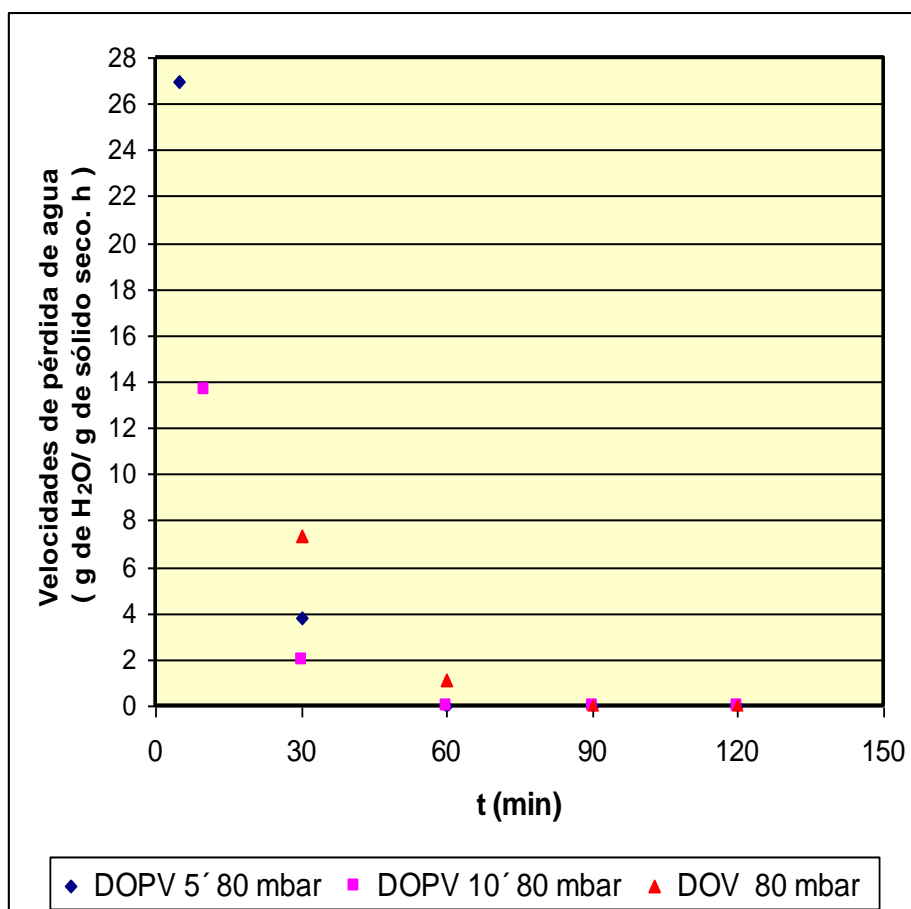
En los anexos J y K se presentan los grafico de humedad libre versus el tiempo, a partir de los cuales se calcularon las velocidades de perdidas de agua para las dos presiones de vacío, mientras que el anexo L presenta las velocidades de

pérdidas de agua para los diferentes tratamientos a las dos presiones.

La figura 3.10 nos muestra las velocidades de pérdida de agua obtenidas en los experimentos realizados a la presión de 80 mbar. Al comparar las velocidades obtenidas en los tratamientos en los que se aplicó un pulso de 5 minutos(DOPV5') y el pulso de 10 minutos(DOPV10'), se determinó que el tratamiento en que se aplica un pulso de vacío durante 5 minutos (DOPV5') ; es el que presentó las mayores velocidades de pérdida de agua durante la primera media hora de tratamiento en comparación con el otro pulso de vacío aplicado, pero luego esta velocidad fue decreciendo considerablemente, siendo que al cabo de dos horas fue la que presentó la menor velocidad de pérdida de agua.

El tratamiento a presión de vacío (DOV) presentó la mayor velocidad a la media hora y a la hora del proceso, esto se debió como se explicó anteriormente a que recién a los tratamientos actúa el mecanismo hidrodinámico que favorece a la pérdida de agua, pero después de este periodo de tiempo la velocidad decreció.

FIGURA 3.10
VELOCIDADES DE PÉRDIDA DE AGUA EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESION DE 80 MBAR.



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Efecto de la presión de vacío.

En las figuras 3.9 y 3.10, se observó que mientras más vacío se aplique al sistema mayor es la velocidad de pérdida de agua, ya

que mayor es el la cantidad de gas que se extrae del poro, aumentando de esta manera la superficie de transferencia de masa y favoreciendo a la rápida difusión del agua hacia la solución osmótica. Presentándose de esta manera una rápida cinética de pérdida de agua principalmente durante en la primera hora de deshidratación. Por lo tanto se determino que en los tratamientos de deshidratación osmótica realizados a presiones de vacío , se eleva la rapidez de difusión del agua, tomando menos tiempo reducir el contenido de humedad del mango (3,4,5,6,7,26).

Velocidades de ganancia de sólidos.

Efecto del tiempo de aplicación de la presión de vacío.

Las velocidades de ganancia de sólidos en los experimentos realizados a la presión de 140 mbar se muestran en la tabla 12, en la cual se puede apreciar que después de aplicar el pulso de vacío durante cinco minutos (DOPV 5'), diez minutos (DOPV 10') y 30 minutos (DOV), la velocidad de ganancia de sólidos es muy similar. Esto se debe a que en indiferentemente del tiempo en que se aplico la presión de vacío, al reestablecer la presión atmosférica, momento en que actúa el mecanismo hidrodinámico, y se permite el ingreso de un volumen muy parecido de jarabe en

todos los experimentos, dando como resultado velocidades de transferencia de sólidos similares (4,7).

TABLA 12
VELOCIDADES DE GANANCIAS DE SÓLIDOS EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESION DE 140 MBAR.

t (min)	V_{sg} DOPV 5 g/h	V_{sg} DOPV 10 g/h	V_{sg} DOV g/h
5	0.36		
10		0.35	
30	0.162	0.072	0.270
60	0.096	0.078	0.072
120	0.072	0.048	0.040

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

La tabla 13 nos presenta las velocidades de ganancia de sólidos para los tratamientos realizados a 80 mbar. Cuando se aplicó un pulso de vacío durante 5 minutos (DOPV 5´), se observó que la velocidad de ganancia de sólidos es la más altas después de

aplicar el pulso de vacío. Se podría decir que esta diferencia de velocidades implica que cuando se aplica más vacío, por un periodo de tiempo más prolongado se afecta la estructura celular del mango, lo que afecta la transferencia de sólidos.

Se puede deducir además que las mayores velocidades de ganancia de sólidos se dan en la primera hora de tratamiento, lo que permite una mayor ganancia de sólidos del mango, disminuyendo el gradiente de concentraciones entre el mango y la solución de sacarosa, por lo tanto disminuye la fuerza impulsora para que se de la difusión de azúcar, de ahí que las velocidades disminuyan considerablemente a las dos horas de proceso (7).

TABLA 13
VELOCIDADES DE GANANCIAS DE SÓLIDOS EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESION DE 80 MBAR.

t (min)	V_{SG} DOPV 5 g/h	V_{SG} DOPV 10 g/h	V_{SG} DOV g/h
5	0.894		
10		0.44	
30	0.126	0.114	0.24
60	0.126	0.078	0.042
120	0.012	0.054	0.018

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Efecto de la presión de vacío.

En las tablas 11 y 12, se puede apreciar que la mayor velocidad de ganancia de sólidos se produjo en el tratamiento que se aplicó pulso de vacío durante cinco minutos (DOPV 5'), a una presión de 80 mbar. Por lo tanto a una mayor presión de vacío, mayores velocidades de ganancia de sólidos.

Coeficientes de transferencia de masa.

Se mencionó anteriormente que el inverso de los coeficientes de transferencia de masa se relaciona con la dificultad para el transporte de un determinado componente, en nuestro estudio esos componentes son el agua y la sacarosa, cuyos coeficientes fueron calculados a partir de las pendientes de los gráficos de los anexos M y N para el coeficiente de difusión del agua y de los gráficos de los anexos O y P para la sacarosa. Los valores de estos coeficientes se muestran en la tabla 14.

Al analizar los procesos de deshidratación osmótica al vacío, desde este punto de vista, buscamos el que presente la menor resistencia a la transferencia de agua, lo que implicaría el proceso que tenga el mayor coeficiente de transferencia de agua, y este se consigue en el tratamiento en que se aplica un pulso de presión de 80 mbar durante 5 minutos (DOPV 5').

En cuanto a la ganancia de azúcar se requiere que el proceso presente la mayor resistencia a la ganancia de azúcar para alterar lo menos posible el sabor característico del mango, esto quiere decir que el coeficiente de transferencia de sólidos tendría que ser el menor posible, presentándose en el tratamiento donde

se aplica la presión de vacío durante 30 minutos (DOV) a la presión de 80 mbar.

Por lo tanto mientras los procesos se realicen a condiciones a mayores condiciones de vacío, los coeficientes de transferencia de agua y sólidos mejoraran.

TABLA 14
COEFICIENTES DE DIFUSION DE AGUA Y DE SÓLIDOS
PARA CADA UNO DE LOS EXPERIMENTOS DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIONES DE VACIO

Experimentos	K_w	K_{SG}	K_w	K_{SG}
	140 mbar	140 mbar	80 mbar	80 mbar
DOPV 5´	0.0311	0.0938	0.0354	0.0976
DOPV 10´	0.0278	0.0894	0.026	0.0966
DOV	0.022	0.0761	0.0288	0.04

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

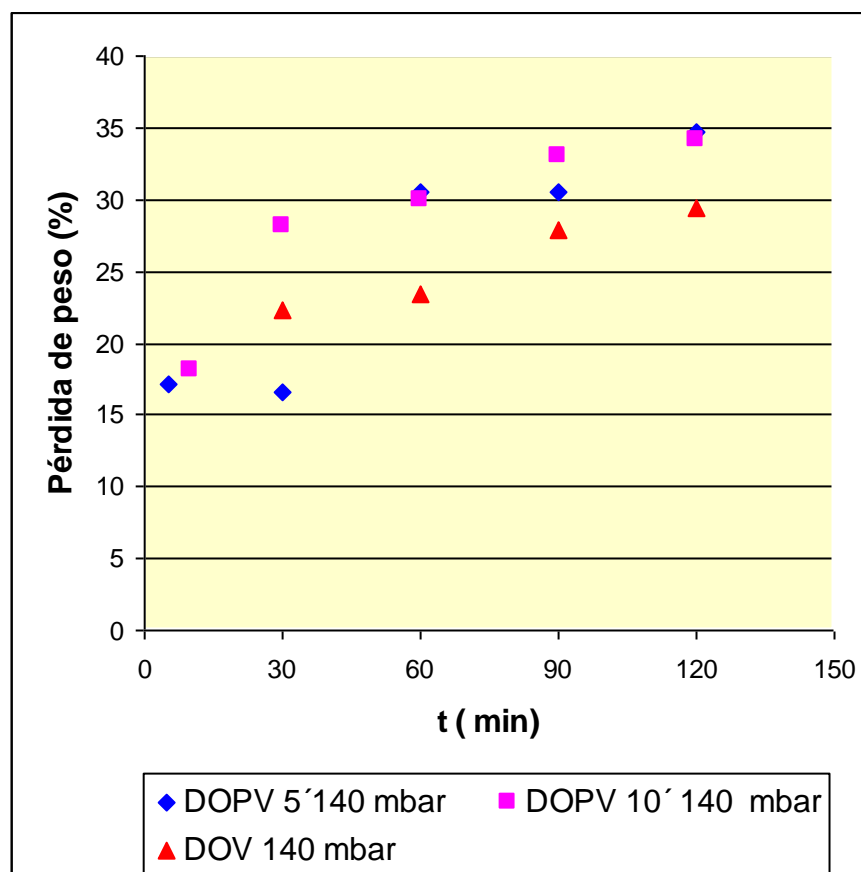
3.2.2 Evaluaciones físicos- químicas.

Porcentaje de Reducción de peso

Efecto del tiempo de aplicación de la presión de vacío

El porcentaje de reducción de peso obtenido en los experimentos realizados a la presión de 140 mbar, se muestran en la figura 3.11. Se observa que los tratamientos en que se aplicó un pulso de vacío, presentaron porcentajes muy similares de reducción de peso aproximadamente 35%, al final de los tratamientos. Por otro lado en el proceso en que se aplicó vacío durante 30 minutos (DOV), el porcentaje de reducción de peso fue menor en comparación con los otros experimentos realizados.

FIGURA 3.11
PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE PESO EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESIÓN DE 140 MBAR



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

En la figura 3.12 se encuentran los porcentajes de reducción de peso presentados en los experimentos realizados a la presión de 80 mbar. El tratamiento en que se aplicó la presión de vacío por 30 minutos (DOV), fue el que presentó la mayor reducción de

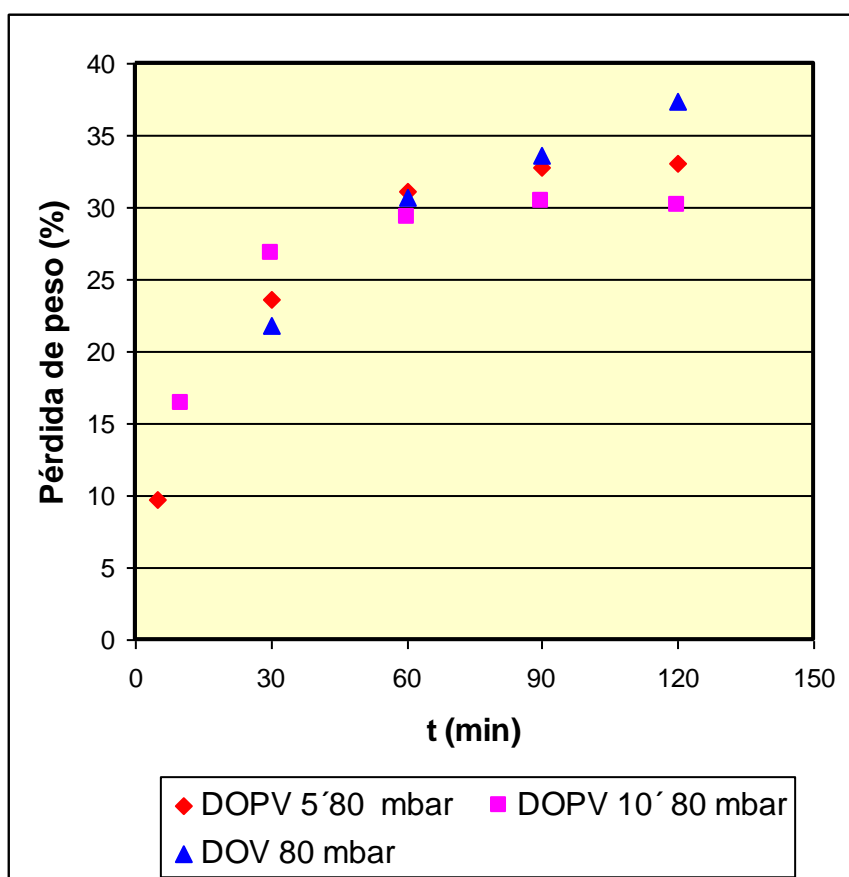
peso (37.4%), mientras en los tratamientos en que se aplicó el pulso de vacío la diferencia de porcentaje de reducción de peso fue mínima.

Por consiguiente en cuanto al porcentaje de pérdida de peso no hay una diferencia significativa entre aplicar un pulso de vacío de 5 minutos y aplicarlo durante 10 minutos, pero si observa una diferencia cuando se aplica la presión de vacío durante 30 minutos.

Efecto de la presión de vacío.

Comparando entre presiones, la reducción de peso es menor cuando al sistema se le aplicó la menor presión de vacío, durante un corto periodo de tiempo, dado que la diferencia de presiones es mayor, permitiendo que ingrese mayor volumen de solución osmótica a los poros del mango, compensando con esto la pérdida peso que se produce por el agua pérdida (5,7).

FIGURA 3.12
PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE PESO EN LOS
EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A
PRESIÓN DE 80 MBAR



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

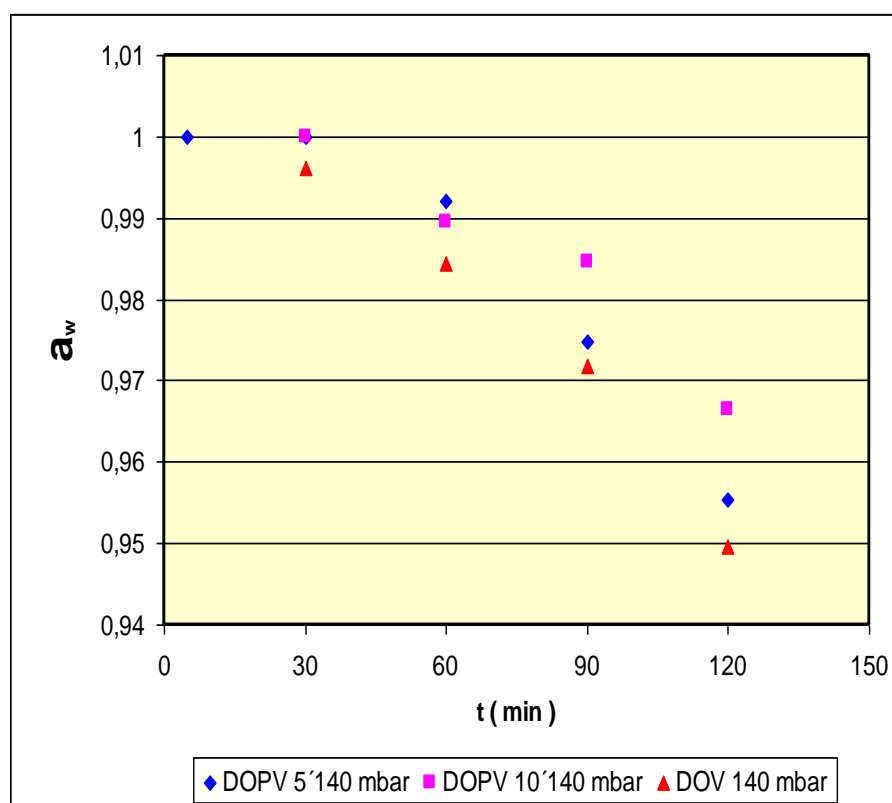
Actividad de agua.

En la figura 3.13 se muestran las actividades de agua para los tratamientos realizados a la presión de 140 mbar. Los

tratamientos DOPV 5' y DOV, a los 90 minutos de tratamiento la actividad de agua llegó a estar entre 0.98 y 0.97, mientras que el tratamiento DOPV 10, tuvo una actividad de agua de 0.985. Al cabo de los 120 minutos, el tratamiento DOV fue el que alcanzó la menor actividad de agua llegando a 0.95.

FIGURA 3.13

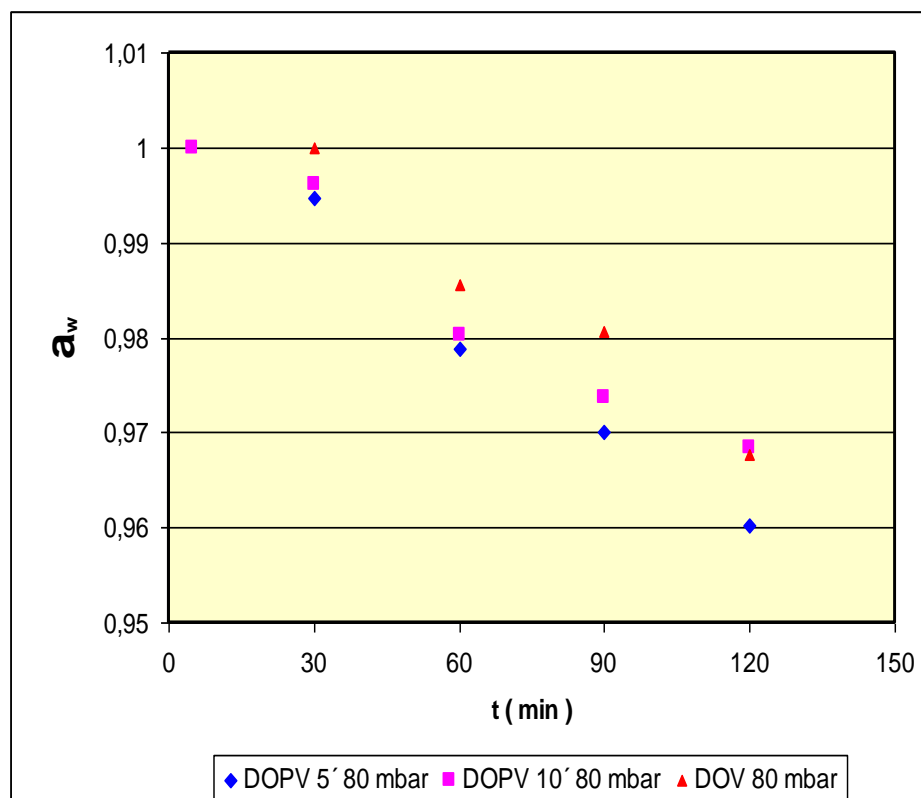
**ACTIVIDADES DE AGUA EN LOS EXPERIMENTOS DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIÓN DE 140 MBAR**



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Por otro lado a la presión de 80 mbar, las actividades de agua obtenidas, son representadas en el gráfico de la figura 3.14, en la cual se puede distinguir, que a los 90 minutos los dos tratamientos en que se aplicó pulso de vacío, presentan actividades por debajo de 0.98 incluso el tratamiento en que se aplicó el pulso de vacío durante 5 minutos, alcanzó una actividad de agua de 0.96 a las dos horas de proceso. Mientras que el tratamiento DOV y DOPV 10' alcanzaron la misma actividad de agua de 0.968.

FIGURA 3.14
ACTIVIDADES DE AGUA EN LOS EXPERIMENTOS DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIÓN DE 80 MBAR



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Color

Para este análisis se determinó en el catalogo de pigmentos alimenticios el color que presentaba el mango antes del proceso, este fue 1138 Benzadine Yellow GT Pigment Yellow 12 Reduced Colour, el cual se puede apreciar en el anexo A. Después de

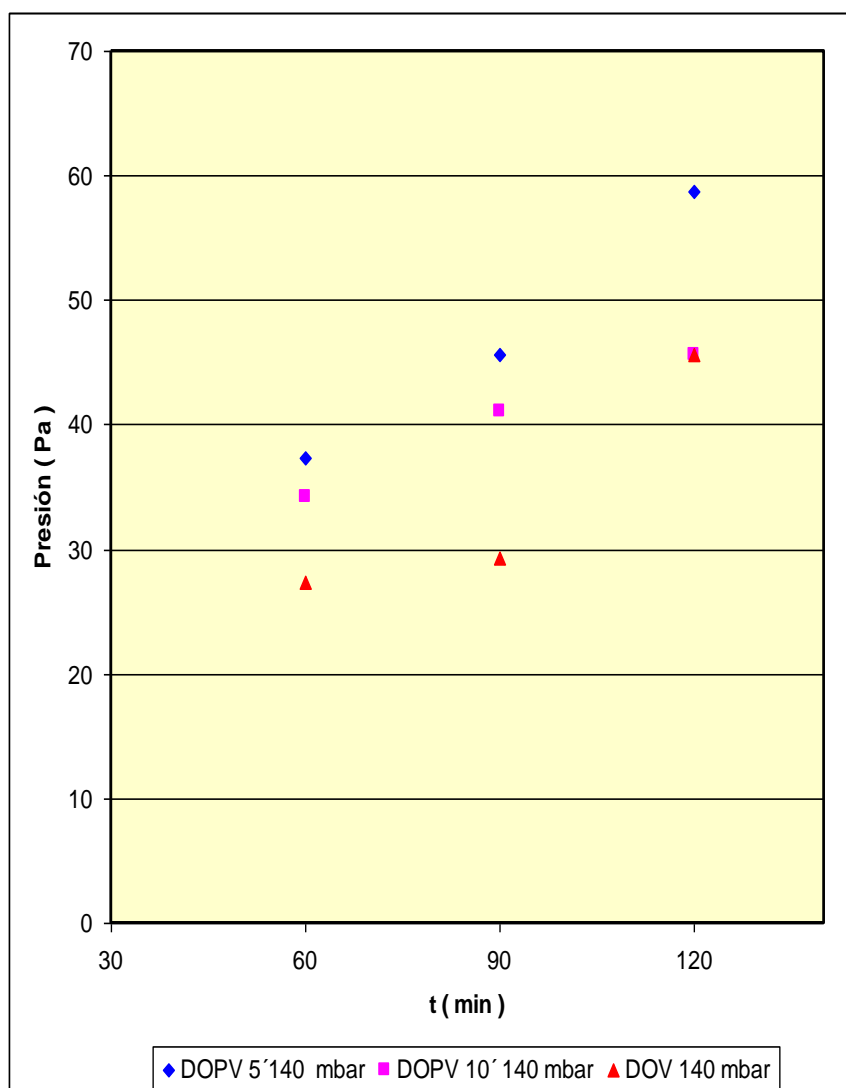
realizar cada uno de los experimentos a presión de vacío y pulso de vacío, el color del mango obtenido al final del proceso se contrastado con el catalogo de pigmentos y se determino que no hubo un cambio de color en el mango, de esta manera se comprobó que los tratamientos realizados a la presión de vacío, no afectan la coloración del mango, si no mas bien mantienen las características iniciales del producto fresco, aportando un ligero brillo , que se debe a la ganancia de azúcar por parte del mango.

Firmeza

La determinación de la firmeza del mango por medio del penetrómetro se basa en la presión necesaria para insertar un puntal de tamaño específico un trozo de mango en un tiempo determinado, es decir que una mayor presión ejercida significaría una mayor dureza del mango (18).

Las figuras 3.15 y 3.16 presentan los resultados obtenidos al medir la firmeza del mango, después de ser sometido a un tratamiento de deshidratación osmótica al vacío.

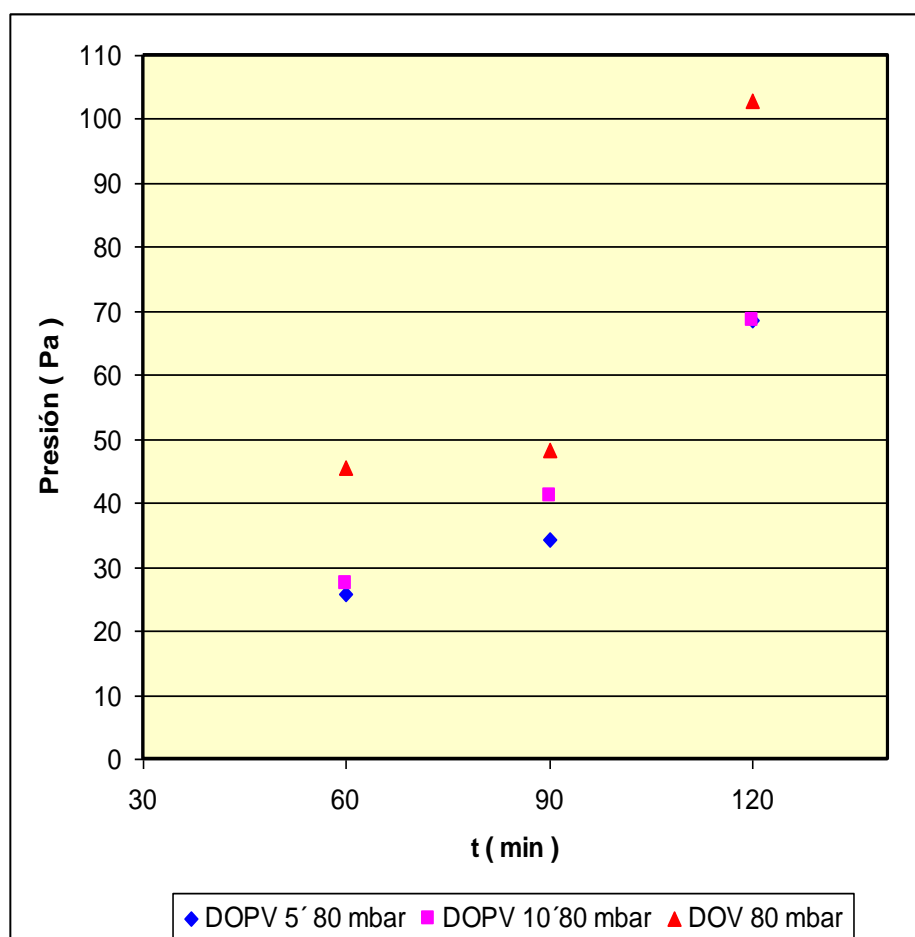
FIGURA 3.15
FIRMEZA EN LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN
OSMÓTICA A PRESIÓN DE 140 MBAR



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Al comparar las dos figuras se determinó que los mangos deshidratados osmóticamente a la presión absoluta de 80 mbar,

presentaron mayor dureza, ya que se tuvo que ejercer mayor presión, para lograr que en penetrómetro ingrese al pedazo de mango, esto se debe a que estos mangos han perdido una mayor cantidad de agua que los pedazos de mango tratados a la otra presión.

FIGURA 3.16**FIRMEZA EN LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIÓN DE 80 MBAR**

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Deformación Volumétrica.

Al determinar la deformación volumétrica, lo que estamos determinando es el efecto del fenómeno deformación – relajación de la matriz sólida del alimento para explicar los cambios producidos en el alimento al ser sometido a una diferencia de presiones (5,6). A continuación la tabla 15 muestra las deformaciones volumétricas ocurridas después de restaurar la presión atmosférica (γ_1), las cuales fueron determinadas por la ecuación 2.11.

TABLA 15
DEFORMACIONES VOLUMETRICAS DESPUÉS DE
RESTAURAR LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA.

	Deformaciones volumétricas	
	cm³/ cm³	
Presiones	140 mbar	80 mbar
DOPV 5	-0,327	-0,453
DOPV 10	-0,206	-0,337
DOV	-0,270	-0,375

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

El signo negativo en las deformaciones volumétricas nos indica que al aplicar la diferencia de presiones se produce una disminución del volumen del mango, esto se debe a la compresión que se ejerce (8). Al comparar el efecto del tiempo de aplicación de vacío nos damos cuenta que existe una mayor deformación volumétrica en los tratamientos donde el pulso se aplica durante 5 minutos. Mientras que analizando el efecto de la presión nos damos cuenta que mientras mayor es la presión de vacío mayor es la deformación volumétrica que se aprecia.

Variación de pH.

Al realizar las mediciones de pH cada media hora, se observó que este no presentaba una variación significativa manteniéndose en el valor inicial de pH para cada uno de los experimentos realizados.

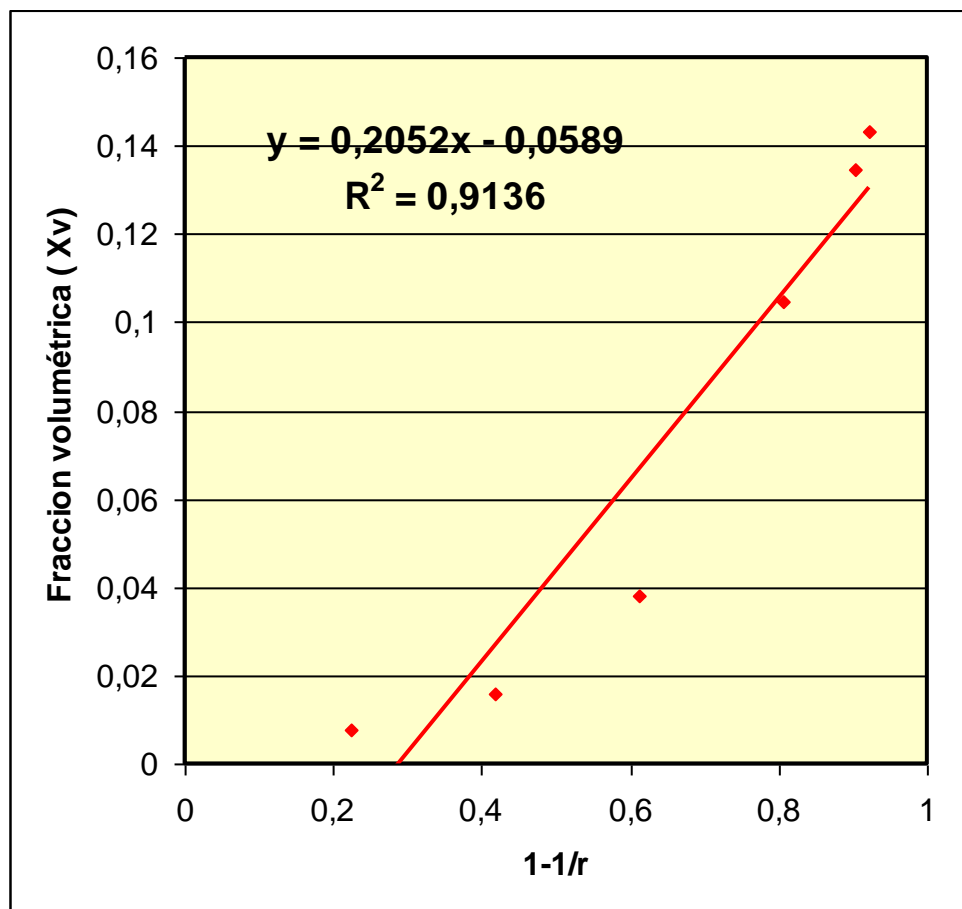
3.2.3 Porosidad del mango a distintas presiones.

La porosidad efectiva (ϵ_e), está definida como la fracción volumétrica de gas en los tejidos de la fruta en comparación con el volumen total de la fruta. (3,4,5,6,7). El gas dentro del tejido de la fruta obstruye el camino para que ocurra la transferencia de

masa, pues no permite el contacto entre el alimento y la solución osmótica, por lo tanto, cuando las frutas son inmersas en una solución de azúcar, el proceso de osmosis se verá influenciado por la porosidad de las mismas (4). Como las frutas presentan distintas porosidades efectivas entonces presentaran distintos comportamientos al deshidratarse osmóticamente, en especial al ser deshidratados al vacío. (4,7).

La figura 3.17 muestra la representación grafica entre la fracción volumétrica total del mango ocupado por una solución isotónica(X_v) (Ec. 1.25) versus el término $1-1/r$, donde r es la relación entre la presión atmosférica y la presión de vacío aplicada, definido así por la ecuación 1.27. Al obtener la regresión lineal de estos datos se obtiene el valor de la pendiente que corresponde a la porosidad efectiva (3,4,5,6,7, 31).

FIGURA 3.17
GRAFICO X VS 1-1/R PARA LOS EXPERIMENTOS
REALIZADOS A DIFERENTES PRESIONES EN MANGO



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L

La ecuación obtenida de los datos experimentales es la siguiente:

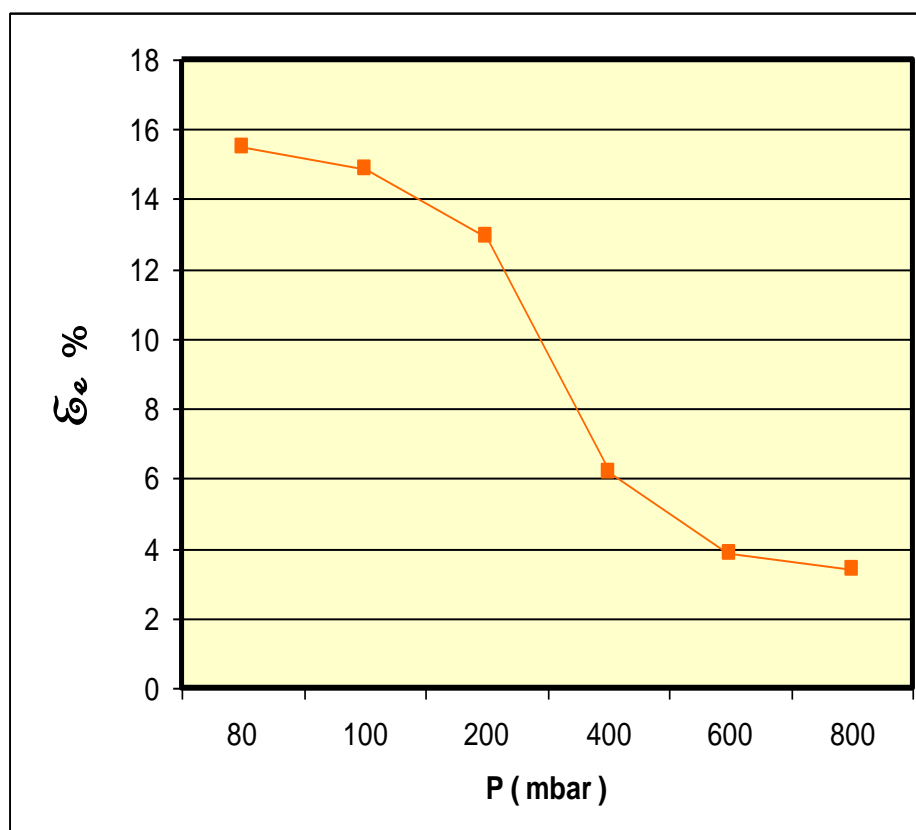
$$y = 0.2052x + -0.0589$$

El valor de la pendiente como se mencionó anteriormente corresponde a la porosidad efectiva y según los experimentos realizados, para el mango este tiene un valor de 21% , lo que nos indica que el mango Tommy Atkins que se produce en el Ecuador , posee una matriz porosa ocupada en un 21 % por gas, el cual puede ser sustituido por la solución osmótica en los tratamientos de vacío. De esta manera la porosidad efectiva indicaría que tan conveniente es para una fruta aplicarle tratamientos de deshidratación osmótica al vacío. (3,4,5,6,7).

Si observamos el anexo Q, donde se presentan la porosidad efectiva de distintas frutas a diferentes presiones obtenidas en los estudios realizados por Fito (1994), se puede apreciar que por debajo de 600 mbar, los valores experimentales de la porosidad efectiva para casi todas las frutas se mantiene prácticamente constante. Pero en el caso del mango y el durazno se observó que la porosidad efectiva aumenta al decrecer la presión. Con el fin de establecer el comportamiento del mango Tommy Atkins cultivado en nuestro país, se determinó la porosidad efectiva a distintas presiones, y se construyó el gráfico presentado en la figura 3.18. Determinándose, que cuando disminuye la presión se produce un incremento en la porosidad efectiva del mango. Esto

se debe posiblemente a la pérdida del líquido nativo durante la etapa de expansión y descarga del gas ocluido en los poros. Esta pérdida da lugar a un incremento en el volumen interno del poro disponible para la fase de gaseosa (5).

FIGURA 3.18
COEFICIENTES DE POROSIDAD PARA EL MANGO TOMY
ATKINKS CULTIVADO EN EL ECUADOR A DISTINTAS
PRESIONES.



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L

Pero no solo la fruta contiene gas, sino también la solución de azúcar, el cual puede adherirse a la superficie de la fruta reduciendo la velocidad de difusión de las moléculas de agua a la solución osmótica (4).

Por consiguiente la función de los tratamientos de vacío durante la deshidratación osmótica no es solamente remover el gas fuera del tejido de la fruta para que el agua, pueda transferirse lo más rápido posible; sino que simultáneamente los tratamientos de vacío extraen el gas de la solución de azúcar, cuando esta circula en un sistema de vacío, lo cual ayudaría en la transferencia de las moléculas de agua a través de la solución osmótica (4).

3.3 Comparación de los resultados de la deshidratación osmótica del mango a distintas presiones.

Pérdidas de agua.

Efecto de la presión

Al analizar el efecto de la presión, comparando las figuras 3.1, 3.7 y 3.8, se pudo distinguir que no hay una diferencia representativa entre las pérdidas de agua obtenidas a presión atmosférica y las conseguidas a la presión de 140 mbar, pero al aplicar la presión absoluta de 80 mbar, se observó un aumento significativo de las pérdidas de agua. Por lo tanto se

puede comprobar que la aplicación de una presión de vacío, favorece notablemente al incremento de las pérdidas de agua.

Efecto del tiempo de aplicación de la presión de vacío

Se observó, que después de aplicar la presión de vacío y reestablecer el sistema a la presión atmosférica, se obtuvieron mayores pérdidas de agua, que las obtenidas en ese mismo instante de tiempo en los experimentos realizados a presión atmosférica. Sin embargo en los tratamientos realizados a presión absoluta de 140 mbar, este aumento de las pérdidas de agua, en la primera hora no fue suficiente, ya que al cabo de las dos horas se observan las mismas pérdidas que las alcanzadas en la deshidratación osmótica a presión atmosférica. Por otro lado, a la presión de 80 mbar las pérdidas de agua siguen aumentando con respecto al tiempo, hasta alcanzar pérdidas de agua superiores a los obtenidos a la presión atmosférica.

Velocidades de pérdidas de agua.

Efecto de la presión

Al analizar las figuras 3.3 ; 3.9 y 3.10 , se puede apreciar que las mayores velocidades de pérdidas de agua, se obtuvieron al aplicar más presión de vacío. Por lo tanto los tratamientos de deshidratación osmótica a presiones de vacío, nos proporcionan la ventaja de aumentar la velocidad

de difusión del agua, tomando menos tiempo reducir el contenido de humedad del mango. (4,5,6).

Efecto del tiempo de aplicación de la presión de vacío.

Al comparar las velocidades de pérdidas de agua obtenidas en cada uno de los tratamientos realizados a presión de vacío, con las alcanzadas en la deshidratación osmótica a presión atmosférica, se observó que los procesos en que se aplica un pulso de vacío durante cinco minutos, son los que presentan las mayores velocidades de pérdidas de agua en los primeros minutos de tratamiento, pero que después de dos horas de proceso, las velocidades tienden a igualarse.

Velocidades de ganancias de sólidos e incremento de sólidos en el mango

Efecto de la presión.

En cuanto a velocidades de ganancia de sólidos no se observó una diferencia representativa, entre los tratamientos realizados a presiones de vacío y los realizados a presión atmosférica. Distinguiéndose que el incremento de sólidos es muy parecido a los resultados observados a presión atmosférica.

Efecto del tiempo de aplicación de la presión de vacío.

Los diferentes tiempos en que se aplicó las presiones de vacío no parecen influenciar en las velocidades y el incremento de sólidos al compararlos con los resultados obtenidos a presión atmosférica.

En conclusión los tratamientos realizados a presiones de vacío ejercen mayor influencia sobre en las pérdidas de agua, ya que estas aumentan pero no influyen significativamente en la ganancia de sólidos.

CAPÍTULO 4

4. ESQUEMA DEL SISTEMA DE DESHIDRATACION OSMOTICA AL VACÍO

4.1 Seleccíon y descripción del proceso.

4.1.1 Seleccíon del proceso.

El estudio realizado demostró que la deshidratación osmótica bajo condiciones de vacío, hace posible obtener una alta velocidad de pérdida de agua a bajas temperaturas de solución osmótica, además de una mejor calidad del producto final en comparación con la deshidratación osmótica a presión atmosférica. De igual manera al comparar los resultados obtenidos en el proceso de deshidratación osmótica aplicando un pulso de presión de vacío (DOPV), con los alcanzados en la deshidratación osmótica a presiones de vacío (DOV), se comprobó que no existe una diferencia representativa, en cuanto a las pérdidas de agua y ganancia de sólidos, determinándose que basta con aplicar un pulso de vacío durante un corto periodo de tiempo, seguido por un largo periodo de

deshidratación osmótica a presión atmosférica, para optimizar los resultados en cuanto a pérdidas de agua, características del producto final y ahorro de energía.

Parámetros de proceso.

La deshidratación osmótica aplicando un pulso de vacío (DOPV), fue elegido como el proceso que presenta las mayores ventajas, a continuación se establecerán los parámetros de proceso, necesarios para la selección de los equipos.

Presión.

Con respecto a la presión de trabajo, se demostró que al aplicar presiones absolutas por debajo de 80 mbar, se obtienen las mayores pérdidas de agua. Por lo tanto la presión debe ser igual o menor a 80 mbar de presión absoluta.

Tiempo de aplicación de la presión de vacío

En el estudio realizado se comparó los resultados al aplicar dos pulsos de vacío diferentes, uno de cinco minutos y otro de diez minutos, demostrándose que no existe una diferencia representativa en el tiempo de duración del pulso de vacío, por consiguiente por cuestiones de ahorro de energía, se estableció

que el proceso se llevaría a cabo aplicando el pulso de presión de vacío durante 5 minutos.

Tiempo de deshidratación a presión atmosférica.

Como se mencionó anteriormente el proceso de deshidratación osmótica a pulso de vacío comprende un periodo de deshidratación osmótica a presión atmosférica después de que el pulso es aplicado. El tiempo de deshidratación osmótica se estableció hasta completar dos horas de tratamiento en total, es decir 115 minutos de deshidratación osmótica a presión atmosférica.

Temperatura y Concentración de la solución osmótica.

Estas variables fueron determinadas al realizar un estudio de deshidratación osmótica a presión atmosférica, donde se varió la temperatura y la concentración del jarabe de sacarosa comparándose las pérdidas de agua y las ganancias de sólidos. Determinándose que la concentración del jarabe debía ser de 55°Brix, y la temperatura del jarabe 45°C, ya que bajo estas condiciones de proceso se presentaron las mayores pérdidas de agua y la menor ganancia de sólidos.

4.1.2 Descripción del proceso.

Proceso de deshidratación osmótica a vacío pulsado de mango.

A continuación se presentan las operaciones que comprenden el proceso de deshidratación osmótica a pulso de vacío de mango.

Preparación de la fruta

Se utilizará en el proceso el mango de la variedad Tommy Atkins, el cual deberá presentar una consistencia firme y estar libre de ataque de insectos, o enfermedades que impidan su consumo.

Luego se seleccionaran los mangos de acuerdo al rango de madurez, que esta determinado en la tabla 4 del capítulo 2 y se presenta en la figura 4.1. Estos mangos se lavaran para eliminar cualquier contaminante o residuo. Luego se procede a pelarlos y cortarlos en pedazos de forma rectangular de $1.0 \text{ cm} \pm 0.05 \times 1.0 \text{ cm} \pm 0.05$ de base y $1.1 \text{ cm} \pm 0.05$ de altura.



FIGURA 4.1 ESTADO DE MADUREZ DEL MANGO

Pesado

Los pedazos de mango serán pesados de acuerdo a la proporción de peso fruta – jarabe, que en el estudio realizado es de 1:10.

Preparación de Solución osmótica.

El agente osmótico utilizado será la sacarosa. La concentración del jarabe será de 55°Brix. Este se preparará y calentará hasta la temperatura de 50°C, en un tanque de acero inoxidable, destinado para esta operación. Una vez que se verifica que la concentración del jarabe sea la correcta; 100 Kg de jarabe deberán ser bombeados al tanque de deshidratación osmótica al vacío.

Deshidratación osmótica a pulso de vacío.

Una vez que el tanque de deshidratación osmótica es llenado con el jarabe; el mango será colocado en las canastas de acero inoxidable. De inmediato se aplicará el pulso de vacío a una presión absoluta de 80 mbar, durante cinco de minutos. Después de este periodo de tiempo la presión atmosférica es reestablecida.

Deshidratación osmótica a presión atmosférica.

El mango se mantendrá sumergido en el jarabe, a una temperatura de 45°C, a presión atmosférica por 115 minutos, es decir hasta completar las dos horas de proceso. Al finalizar el proceso, los mangos se escurrieran para eliminar los residuos de jarabe en superficie.

Diagrama de flujo del proceso.

A continuación la figura 4.2 presenta el diagrama del proceso de deshidratación osmótica a pulso de vacío de mango.

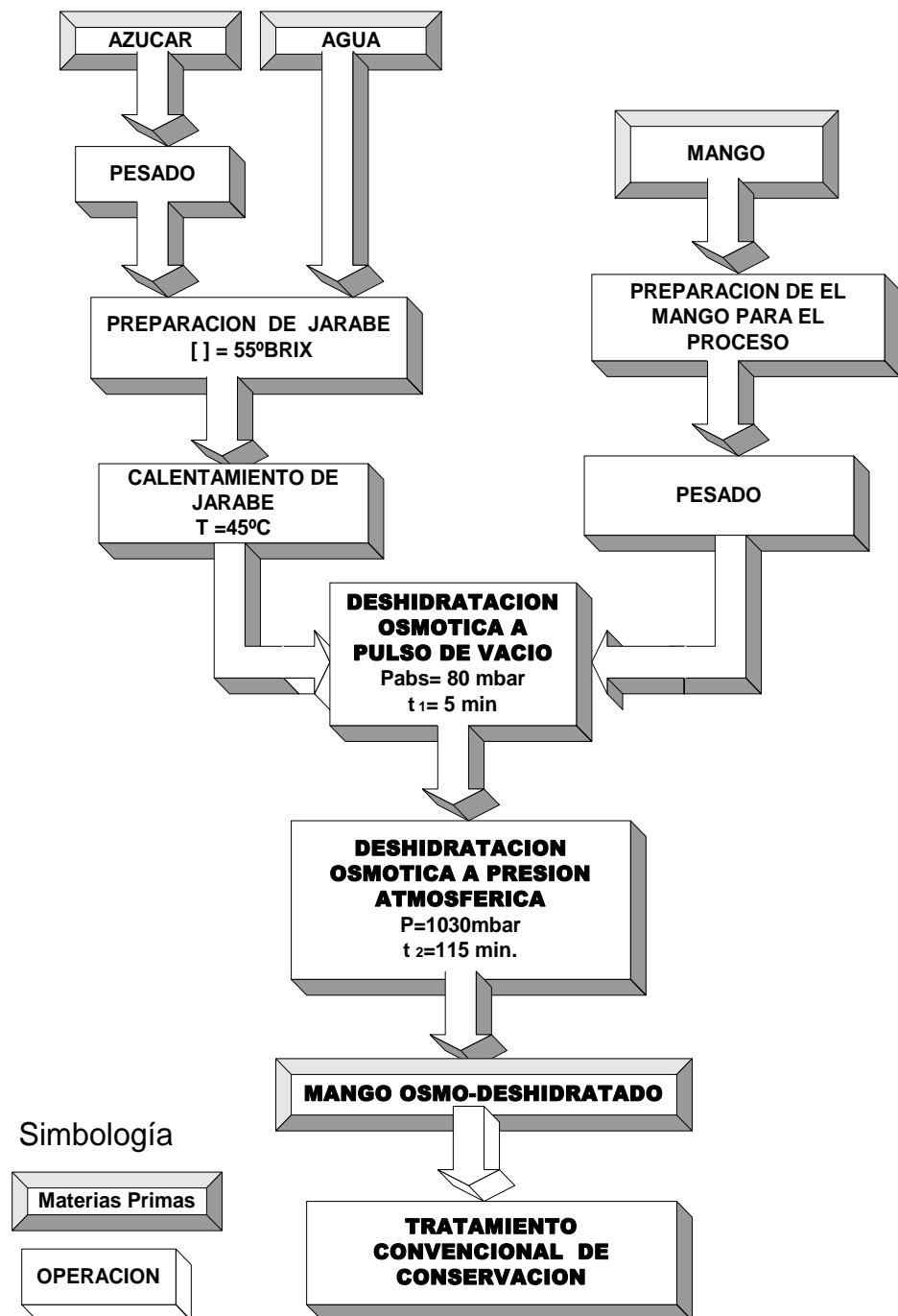


FIGURA 4.2 PROCESO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DEL MANGO AL VACÍO

4.3 Selección de equipos para el proceso

Capacidad de proceso del Sistema Deshidratación osmótica al vacío.

Se diseñara un sistema de deshidratación osmótica al vacío que permita realizar pruebas a nivel piloto. El diseño del sistema pretende brindar la funcionalidad y versatilidad que permita desarrollar nuevos procesos de deshidratación osmótica al vacío con otras frutas.

La capacidad del sistema será de 10 kg de fruta. El esquema del sistema de deshidratación osmótica se presenta en el anexo R.

Detalle de equipos necesarios para el proceso.

Los principales equipos para el sistema de deshidratación osmótica al vacío son los siguientes:

- Equipo de preparación de jarabe.
- Equipo de deshidratación osmótica a presión de vacío.

Equipo de preparación de jarabe

Este equipo permitirá la preparación y el calentamiento del jarabe .

El equipo estará constituido por:

- Tanque
- Agitador
- Serpentín de calentamiento

Descripción del tanque de preparación de jarabe.

Cálculo de la capacidad del tanque

Se determinó que la cantidad máxima de jarabe que se necesitaba preparar eran 120 litros de jarabe, por lo tanto con este volumen se procedió al cálculo de las dimensiones del tanque, para ello se utilizó la ecuación del volumen de un cilindro que se presenta a continuación:

$$V_c = \pi r^2 h \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

V_c = Volumen del tanque cilíndrico (m³).

r^2 = Radio del tanque cilíndrico (m).

h = Altura del tanque cilíndrico (m).

Asumiendo que el diámetro del tanque es de 0.45 m se despejó la altura, quedando la siguiente ecuación:

$$h = \frac{4V_c}{\pi D^2} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

V_c = Volumen del tanque cilíndrico (m³).

D^2 = Diámetro del tanque cilíndrico (m).

h = Altura del tanque cilíndrico (m).

Determinándose que la altura del tanque es de 0.76 m. En la tabla 16 se muestran las características del tanque.

TABLA 16
CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE DE PREPARACIÓN DE
JARABE.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Material	Acero inoxidable AISI 316 L
Capacidad volumétrica	120 litros
Diámetro	0.45 m
Altura	0.76 m

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Selección del tipo de agitador.

Se seleccionó el agitador tipo paletas por ser uno de los más frecuentes utilizados en la industria alimenticia. Las características del agitador se encuentran en la tabla 17.

TABLA 17
CARÁCTERÍSTICAS DEL AGITADOR.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Tipo de agitador	Paletas
Material	Acero inoxidable AISI 316 L
Motor eléctrico	110 V
Potencia	0.1 hp
Velocidad	100 rpm
Longitud de paleta	0.25 m
Altura	0.05 m

Fuente: Talleres A δ H.

Serpentín de calentamiento.

Determinación de las dimensiones del serpentín de calentamiento

Para determinar las dimensiones del serpentín de calentamiento es necesario establecer las propiedades físicas del medio de calentamiento y del jarabe que se desea calentar.

Propiedades físicas del medio de calentamiento.

El medio de calentamiento que circulara por el serpentín es agua a la temperatura de 60°C, la cual va ser suministrada por un calefactor de

agua. Las propiedades físicas del agua a esta temperatura, se detallan a continuación en la tabla 18 (28).

TABLA 18
PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA A LA PRESIÓN DE SATURACIÓN

Propiedades físicas	
Temperatura (°C)	60
Densidad (kg/ m³)	983,2
Calor específico (kJ/ kg °C)	4,181
Conductividad térmica (kJ/m °C s)	0,000658
Viscosidad (kg/ m s)	0,00047165

Fuente: Adaptado de Raznievie (1978).

Propiedades físicas del jarabe.

Las propiedades físicas del jarabe fueron determinadas utilizando la ecuación de Choi y Okos (1986) que se expone a continuación (28):

$$k = k_i X_{vi} \quad (\text{Ec 4.3})$$

Donde:

k = Conductividad térmica del alimento (W/m K).

k_i = Conductividad térmica del componente puro (W/m K).

X_{vi} =Fracción de volumen de cada componente.

La fracción de volumen de cada componente y la densidad del alimento se determinan por las ecuaciones 4.4 y 4.5 respectivamente, propuestas por Choi y Okos (1966) (28):

$$X_{vi} = X_i \rho / \rho_i \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$\rho = \frac{1}{\left[\sum \frac{X_i}{\rho_i} \right]} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde:

ρ = Densidad del alimento (kg/m³).

ρ_i = Densidad del componente puro (kg/m³).

X_i = Fracción másica.

Esta ecuación también se puede aplicó para hallar el calor específico del alimento. Las propiedades físicas del componente puro del alimento a una temperatura determinada se calculan mediante el uso de la tabla del anexo S. La viscosidad del jarabe se determinó por medio de la tabla titulada “viscosidad de soluciones de sacarosa” (23), que se presenta en el anexo T. A continuación la tabla 19 presenta la

propiedades físicas del jarabe de sacarosa a la temperatura media de 37.5 °C.

TABLA 19
PROPIEDADES FÍSICAS DEL JARABE DE SACAROSA

Propiedades físicas	
Sólidos solubles (° Brix)	55
Densidad (kg /m³)	940,15
Calor específico (kJ/ kg °C)	1,71
Conductividad térmica (kJ/s m °C)	0,223 x 10⁻³
Viscosidad (kg/ m s)	0,01885

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Cálculo de las características del serpentín de calentamiento.

Para determinar las características del serpentín de calentamiento, se utilizó la siguiente ecuación (17):

$$Q = U_d A \Delta T \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde:

Q = Calor necesario para calentar el jarabe (kJ/h)

U_d = Coeficiente global de transferencia de calor sucio (kJ/ m² °C h)

A = Área de transferencia de calor (m²).

ΔT = Variación de temperaturas (°C).

Se determinó entonces el área de transferencia de calor (A) despejando la ecuación anterior y obteniendo:

$$A = \frac{Q}{U_d \Delta T} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Para realizar el cálculo se establecieron además los datos que constan en la tabla 20 que a continuación se presenta:

TABLA 20
DATOS PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA DE TRANSFERENCIA
DE CALOR

Temperatura inicial del jarabe frío t_1 ($^{\circ}$ C).	25
Temperatura del jarabe frío al final t_2 ($^{\circ}$ C).	50
Masa del jarabe m (kg)	112.47
Tiempo de calentamiento θ (min)	10
Viscosidad del jarabe en las paredes del tanque (kg/ m.s)	0.003921
Velocidad de masa (kg/m ² s)	140

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Luego de esto se procedió al cálculo del coeficiente global de transferencia de calor sucio (U_d) para que esta dado por las siguientes ecuaciones (17):

$$U_c = \frac{h_{oj} \cdot h_i}{h_{oj} + h_i} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{U_c} + R_f \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Donde:

U_d = Coeficiente global de transferencia de calor sucio (kJ/ m² °C s)

U_c = Coeficiente global de transferencia de calor limpio (kJ/ m² °C s)

h_i = Coeficiente individual de transferencia de calor del agua en el serpentín. (kJ/ m² °C s)

h_o = Coeficiente individual del jarabe contenido en el tanque
(kJ/ m² °C s)

R_f = Factor de ensuciamiento (W/m²°C s)

Cálculo de los coeficientes individuales de transferencia de calor.

Coeficiente individual del el alimento contenido en el tanque.

El coeficiente de película h_0 para el jarabe contenido en el tanque agitado puede calcularse mediante la ecuación de coeficientes exteriores para fluidos con agitación mecánica que se presenta a continuación (17):

$$\frac{h_o D_i}{k_f} = 0.87 \left(\frac{L_p^2 N \rho}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{C_p \mu}{k_f} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

en la que:

D_i = diámetro interior del tanque agitado (m)

k_f = Conductividad térmica del jarabe (kJ/ s m °C)

L_p = Diámetro o longitud característica del agitador (m)

N = Velocidad de giro del agitador (rps)

ρ = densidad del jarabe (kg /m³)

μ = viscosidad del jarabe (kg/ m.s).

μ_w = viscosidad en las paredes del tanque (kg/ m.s).

La longitud característica del agitador (L_P) esta dado por la fórmula:

$$L_p = \frac{\text{longitud.de.la.paleta.del.agitador}}{\text{altura.del.agitador}} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Dando como resultado que:

$L_p = 5 \text{ m}$

Con este valor se procedió a calcular los otros términos de la ecuación

4.10 dando los siguientes resultados:

$$\left(\frac{L_p^2 N \rho}{\mu} \right)^{2/3} = 19687.63$$

$$\left(\frac{C_p \mu}{k_f} \right)^{1/3} = 4.94$$

$$\left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1.25$$

$$\frac{h_o D_i}{k_f} = 0.87 \left(\frac{L_p^2 N \rho}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{C_p \mu}{k_f} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} = 105410$$

$$h_o = 0.87 \frac{k_f}{D_i} = 62.6 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ \text{C}}$$

Coficiente individual de transferencia de calor para el agua en el serpentín.

Para determinar el coeficiente individual de transferencia de calor del agua en el serpentín (h_i) se utilizo la ecuación:

$$jH = \frac{h_i D_i}{k} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Donde:

h_i = Coeficiente individual de transferencia de calor del agua en el serpentín (kJ/ m² °C s)

d_i = diámetro interno de la tubería del serpentín

k = Conductividad térmica del agua (KJ/s m. °C)

C_p = Calor especifico del agua (KJ/kg °C).

μ = viscosidad del agua (kg/ m.s).

μ_w = viscosidad del agua en las paredes del serpentín (kg/ m.s).

jH = factor que se obtiene a partir de la grafica del anexo U.

Para hallar el jH es necesario primero encontrar el número de Reynolds que está dado por la siguiente ecuación:

$$R_e = \frac{D_i G}{\mu} \quad (\text{Ec 4.13})$$

Donde:

D_i = diámetro interno de la tubería del serpentín (m).

μ = viscosidad del agua (kg/ m.s).

G = velocidad de masa (kg/ h m²).

Dando como resultado que:

$$Re = 8890.3$$

Por lo tanto jH es igual a:

$$jH = 34$$

Entonces el h_i se despeja de la ecuación 4.12 y se obtiene:

$$h_i = jH \frac{k}{D_i} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (\text{Ec. 4.14})$$

Entonces h_i da como resultado:

$$h_i = 1.1 \frac{kJ}{m^2 \cdot s \cdot ^\circ C}$$

Es necesario corregir con los diámetros internos y externos:

$$h_{io} = h_i \frac{D_i}{D_o} \quad (\text{Ec. 4.15})$$

Donde:

D_i = diámetro interno de la tubería del serpentín (m).

D_o = diámetro exterior de la tubería del serpentín (m).

Por lo tanto:

$$h_{io} = 0.96 \frac{kJ}{m^2 \cdot s \cdot ^\circ C}$$

Luego valores de h_o y h_{io} son reemplazados en la ecuación Ec. 8, donde se obtiene el valor de U_c .

$U_c = 169.33 \text{ Btu/h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$
--

El valor del factor de ensuciamiento R_f para agua potable se lo obtiene de la tabla del anexo V. Al resolver la ecuación 4.9 se obtienen que el valor de U_d donde:

$$U_d = 126.5 \text{ Btu/h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Entonces se procedió a calcular el calor necesario para calentar el jarabe a partir de la ecuación:

$$Q = mC_p \Delta T \quad (\text{ Ec. 4.16})$$

Con los datos de la tabla 20 se obtiene que el calor necesario es:

$$Q = 27312.89 \text{ Btu/h}$$

Asumiendo que el equipo tiene una eficiencia del 75% el calor que es necesario suministrar es:

$$Q = 31141.12 \text{ Btu/h}$$

La diferencia de temperatura debe ser calculada como una diferencia logarítmica de temperaturas que esta dada por la ecuación:

$$MLDT = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} \quad (\text{ Ec 4.17})$$

Dando como resultado:

$$MLDT = 73.1^{\circ} F$$

Entonces reemplazando los valores obtenidos en la ecuación 4.7 se obtiene el área de transferencia de calor que es igual:

$$A = 3.69 \text{ pie}^2$$

Cálculo del número de vueltas del serpentín.

Para determinar el número de vueltas necesarias de serpentín de se debe calcular primero el área de transferencia de calor de las longitudes de entrada y salida del serpentín mediante la siguiente ecuación:

$$A_L = \pi D_o L_{io} \quad (\text{Ec 4.18})$$

Donde:

A_L = Área de transferencia de calor de las longitudes de salida y entrada del serpentín (pie^2).

D_o = Diámetro exterior del serpentín (pie).

L_{io} = Longitud de entrada mas la longitud de salida del serpentín (pie).

El valor de L_{io} se asumió como 2.62 pies y se determinó el valor de A_t que resultó:

$$A_L = 0.91 \text{ pies}$$

Para el cálculo del número de vueltas del serpentín (N_k) se utilizó la siguiente ecuación (17):

$$N_k = \frac{A - A_t}{\pi D_o L_c} \quad (\text{Ec 4.19})$$

Donde:

N_k = Número de vueltas del serpentín.

A = Área de transferencia de calor (pie²)

A_L = Área de transferencia de calor de la longitud de entrada y salida del serpentín (pie²).

D_o = Diámetro interior del exterior del tubo del serpentín (pie).

L_c = Longitud de una vuelta del serpentín (pie).

La longitud de una vuelta del serpentín (L_c) está dada por la siguiente ecuación:

$$L_c = \pi D_c \quad (\text{Ec 4.20})$$

Donde:

D_c = Diámetro del espiral del serpentín (pie)

El diámetro del espiral del serpentín es parte del diseño del serpentín y se determino como 0.92 pies. Entonces se determinó el número de vueltas de vueltas, que dio como resultado:

$N_k = 3$ vueltas

Por lo tanto la tabla 21 nos muestra las características del serpentín de calentamiento.

TABLA 21
CARACTERÍSTICAS DEL SERPENTÍN

Diámetro interno (m)	0.0335
Diámetro exterior (m)	0.03
Diámetro del espiral (D_c) (m)	0.28
Paso(m)	0.15
Longitud de entrada	0.4
Longitud salida	0.3

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

Tanque de deshidratación osmótica a presión de vacío

Este equipo se utilizará para dos funciones:

- Aplicación del pulso de vacío al sistema mango–jarabe.
- Deshidratación osmótica a presión atmosférica.

Descripción del equipo.

La capacidad del equipo será de 10 kg de fruta. El equipo consta de los siguientes elementos:

- Tanque que soporte presiones de vacío.
- Aislamiento térmico
- Sistema de regulación y control de temperatura.

Tanque de vacío.

Cálculo de la capacidad del tanque

Se determinó que el volumen mínimo del tanque debía ser de 150 litros. Se asumió que la altura es dos veces el diámetro. Por lo tanto al reemplazar estos datos se obtiene la ecuación 4.17 que nos permite determinar el diámetro del tanque.

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{2V}{\pi}} \quad (\text{Ec 4.21})$$

Al reemplazar los datos se obtiene que el diámetro del tanque es de 0.47 m y la altura del mismo es 0.94 m.

TABLA 22
CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE DE VACÍO.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Material	Acero inoxidable AISI 316 L
Capacidad volumétrica	150 litros
Diámetro	0.47 m
Altura	0.94 m

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

El tanque deberá tener una canasta de acero inoxidable de 30 cm de diámetro interno. Esta canasta se dividirá en 15 compartimientos que se tendrán 4 cm de altura, con malla de acero inoxidable. Dentro de esta canasta se colocará la fruta.

Aislante térmico.

Los tanques que contienen materiales por encima de la temperatura ambiente, pueden requerir aislamiento para reducir las pérdidas de calor. Se pueden emplear casi todos los materiales aislantes que se

emplean comúnmente. Entre ellos se encuentran: silicato de calcio, fibra de vidrio, lana mineral y espumas de plástico (24).

El aislante escogido fue lana mineral cuyas características se muestran en la tabla 23 (24).

TABLA 23
CARACTERÍSTICAS DEL AISLANTE.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Material	Lana mineral
Densidad aparente lb/pie³	9.4
° F	86
Conductividad termica (k) Btu/ h pie °F	0.0225

Fuente: Manual del ingeniero Químico , Perry

Cálculo del espesor del aislante

Para determinar el espesor del aislante primero determinaremos el calor que se pierde por convección natural en un sistema cerrado para ello utilizaremos la ecuación 4.22 (17):

$$Q = \frac{K_{eq} \Delta T A}{\delta} \quad (Ec 4.22)$$

Donde:

Q = Calor perdido por convección libre.

A = Área de transferencia de calor (m^2).

K_{eq} = Conductividad equivalente.

δ = Diámetro equivalente (m)

Primero se cálculo la conductividad equivalente la cual esta dada por la siguiente ecuación (17):

$$K_{eq} = kE_c \quad (\text{Ec 4.23})$$

Donde:

k = Conductividad del jarabe.

E_c = Factor que depende de el numero de Prandlt y del número de Grashof .

La ecuación para hallar E_c depende del valor de la multiplicación de los números de Prandlt y Grashof por lo tanto se precedió a calcular estos dos valores y multiplicarlos para determinar la ecuación de E_c que debía emplearse:

$$P_r = \frac{C_p \mu}{k} = 40.31 \quad (\text{Ec 4.24})$$

$$Gr = \frac{\delta^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} = 238898929.4 \quad (\text{Ec 4.25})$$

$$P_r \times G_r = 9631112026$$

Cuando $10^6 < P_r G_r < 10^{10}$; la ecuación para calcular E_c es la siguiente (17):

$$E_c = 0.4(P_r G_r)^{0.2} \quad (\text{Ec 4.26})$$

Por lo tanto el valor de E_c es:

$E_c = 39.70$

Entonces se cálculo el valor del calor perdido a partir de la ecuación 4.19 dando como resultado:

$Q = 64 \text{ W}$

Este calor también es igual a la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{T_3 - T_1}{R_{acero} + R_{aislante}} \quad (\text{Ec 4.27})$$

Donde:

Q = Calor máximo que se pierde a través de la pared

T_1 = Temperatura en el interior del tanque (45°C)

T_3 = Temperatura en el medio ambiente (25°C)

R_{acero} = Resistencia térmica del acero

$R_{aislante}$ = Resistencia térmica del aislante

Las resistencias térmicas se calcularon a partir de las ecuaciones(17,29):

$$R_{acero} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L k_{acero}} \quad (\text{Ec 4.28})$$

$$R_{aislante} = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi L k_{aislante}} \quad (\text{Ec 4.29})$$

Donde:

L = Longitud del tanque.

k_{acero} = Conductividad térmica del acero (26 Btu / h pie °F)

$k_{aislante}$ = Conductividad térmica del aislante (0.0225 Btu / h pie °F).

r_1 = radio interior del tanque (0.235 m)

r_2 = radio exterior del tanque (0.23515 m)

r_3 = radio del aislante.

A partir de la ecuación 4.29 se obtiene el espesor del aislante y para ello se procedió a calcular la resistencia del acero, obteniéndose como resultado:

$$R_{acero} = 2.4019^{-6^{\circ}} C_S / kJ$$

Despejando de la ecuación 4.24 se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{T_1 - T_3}{Q_p} - R_{acero} = R_{aislante} \quad (\text{Ec. 4.30})$$

Dando como resultado que la resistencia del aislante es:

$$R_{aislante} = 0.3125^{\circ} C_S / kJ$$

Al despejar la ecuación 4.26 resulta que:

$$\frac{r_3}{r_2} = e^{R_{aislante} \times 2\pi L k} \quad (\text{Ec. 4.31})$$

Al reemplazar los datos se obtiene que el espesor del aislante r_3 es igual a:

$$r_3 = 1.8 \text{ cm}$$

Sistema de regulación y control de temperatura

Este sistema consta de:

- Termocupla.
- Control de temperatura
- Resistencia eléctrica.

El sistema funciona de la siguiente forma, la termocupla mide la temperatura del jarabe y manda una señal al control de temperatura el cual esta programado a 45°C, al recibir esta señal compara la temperatura tomada por la termocupla para verificar que esta sea 45°C, si esto no sucede envía una señal a la resistencia eléctrica para que se encienda, en el momento que la temperatura de la termocupla y la temperatura programada se igualan la resistencia deja de calentar el tanque.

Equipos auxiliares

Además de los dos equipos principales para la implementación del sistema de deshidratación osmótica al vacío de necesitaran los equipos auxiliares que se detallan en la tabla 24.

TABLA 24
CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS AUXILIARES PARA EL
SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN OSMOTICA AL VACÍO

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
Calentador de agua	Capacidad : 30 galones Temperatura : 60°C Voltaje de alimentación:110 V
Bomba para agua caliente periférica PK -100	Potencia: 1.5 hp Voltaje de alimentación: 110 V
Bomba para jarabe de acero inoxidable grado alimenticio	Potencia: 2 hp Voltaje de alimentación:110 V
Bomba de vacío	Potencia: 10.5 kW Capacidad máxima: - 760 mm de Hg Voltaje de alimentación : 110 V.
Resistencia eléctrica	Potencia: Voltaje de alimentación: 110V
Termocupla	Tipo: J Potencia: 1000 W Rango de Temperatura: 0- 300°C
Regulador y Control de temperatura.	Tipo: J Voltaje de alimentación: 110-220 V
Termómetro	Rango de medición: 0-100°C
Vacúometro	Rango de medición: -760 mm de Hg

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L

Otras aplicaciones del equipo.

El equipo se puede aplicar para realizar experimentos donde se estudie la impregnación al vacío, que es una técnica que aprovecha la microestructura porosa del alimento. Puesto que cuando un alimento sólido poroso se sumerge en el interior de una solución acuosa y el sistema se somete a vacío, penetra una cierta cantidad de líquido en el interior de los poros tras la ruptura de dicho vacío. Esta penetración de líquido en el alimento, modifica substancialmente su composición y por lo tanto sus propiedades físicas. Esta técnica se puede utilizar para la incorporación de ciertos nutrientes, que permiten obtener los conocidos alimentos funcionales. Esta técnica también se puede utilizar para la salazón y curado de alimentos.(31)

4.3 Inversión estimada.

A continuación se presenta la tabla 25 muestra un costo aproximado de los equipos necesarios para la implementación del sistema de deshidratación osmótica al vacío.

TABLA 25
COSTOS ESTIMADOS DE LOS EQUIPOS PARA EL SISTEMA DE
DESHIDRATACIÓN OSMOTICA AL VACÍO

EQUIPO	COSTO (\$)
Tanque de vacío de acero inoxidable	1.800
Tanque de preparación de jarabe de acero inoxidable con agitador	2.500
Calentador de agua	140
Bomba para agua caliente	166
Bomba para jarabe de acero inoxidable grado alimenticio	620
Bomba de vacío	310
Resistencia eléctrica	60
Termocupla	40
Regulador y Control de Temperatura.	60
Termómetros	55
Vacúometro	26
Tubería de acero inoxidable grado alimenticio.	100
Accesorios de grifería (válvulas, T, codos)	60
Total	5937

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L

Es decir que para implementar un sistema de deshidratación osmótica al vacío, se necesita una inversión estimada de \$ 6000.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con los resultados obtenidos se puede concluir que:

1. La aplicación de presiones de vacío durante la deshidratación osmótica tuvo una importante influencia sobre la transferencia de masa, debido al efecto del mecanismo hidrodinámico. La diferencia de presiones, provoca un mayor ingreso de la solución osmótica en los poros del alimento, aumentando de esta manera la superficie de contacto entre el alimento y la solución osmótica, favoreciendo así a la transferencia de masa.
2. La principal ventaja que se observó en la deshidratación osmótica efectuada a presiones de vacío en comparación al proceso realizado a presión atmosférica, fue las altas velocidades de difusión del agua, que se presentaron en los experimentos realizados bajo condiciones de vacío. a presión atmosféricas. Por

lo tanto, tomaría menos tiempo reducir el contenido de humedad de la fruta, y como se trabaja a bajas temperaturas, se lograría un producto de alta calidad organoléptica.

3. En cuanto el efecto de la magnitud de la presión de vacío se determinó que mientras mayor sea la presión de vacío que se aplique las pérdidas de agua serán más mayores .

4. El tiempo de aplicación de vacío no tiene un efecto representativo en las pérdidas de agua, puesto que se observaron similares pérdidas de agua al aplicar dos pulsos de vacío diferentes y la presión de vacío por 30 minutos . Esto se debe a que el efecto más significativo del mecanismo hidrodinámico, ocurre cuando se reestablece el sistema a la presión atmosférica, ya que es en este momento ingresa la mayor cantidad de solución al poro del alimento, aumentando la superficie de contacto y favoreciendo los mecanismo de transferencia de masa. Por lo tanto, la deshidratación osmótica a pulsos de vacío por 5 minutos es entonces la que ofrece las mayores ventajas, ya que se obtienen similares pérdidas de agua que en los otros tratamientos, con el mayor ahorro de energía.

5. La desventaja que presenta este proceso de deshidratación osmótica bajo presiones de vacío, es el alto costo de la implementación del equipo. Pero el equipo se podría utilizar para la deshidratación de otras frutas la impregnación de otros alimentos como el pescado o queso con salmueras y para el desarrollo de alimentos funcionales.
6. La porosidad efectiva puede ser usada como un indicador de la conveniencia de someter una fruta a un tratamiento de vacío. Las frutas que presenten una alta porosidad serán las más compatibles para ser tratadas bajo condiciones de vacío durante la deshidratación osmótica, puesto que será más fácil la remoción de gas y la introducción de la solución osmótica.

5.2 Recomendaciones.

1. Es necesario continuar los estudios de deshidratación osmótica al vacío, en otras frutas y vegetales característicos de nuestro país, con el fin de aprovechar los excedentes de las exportaciones y desarrollar productos de mejor calidad.

2. El equipo que se desarrollo para la realización del presente estudio puede servir para el estudio del proceso de impregnación al vacío, que es la técnica que se utiliza para el desarrollo de los alimentos funcionales, es decir alimentos procesados que contienen ingredientes que ayudan a funciones específicas del organismo, como pueden ser vitaminas y minerales.

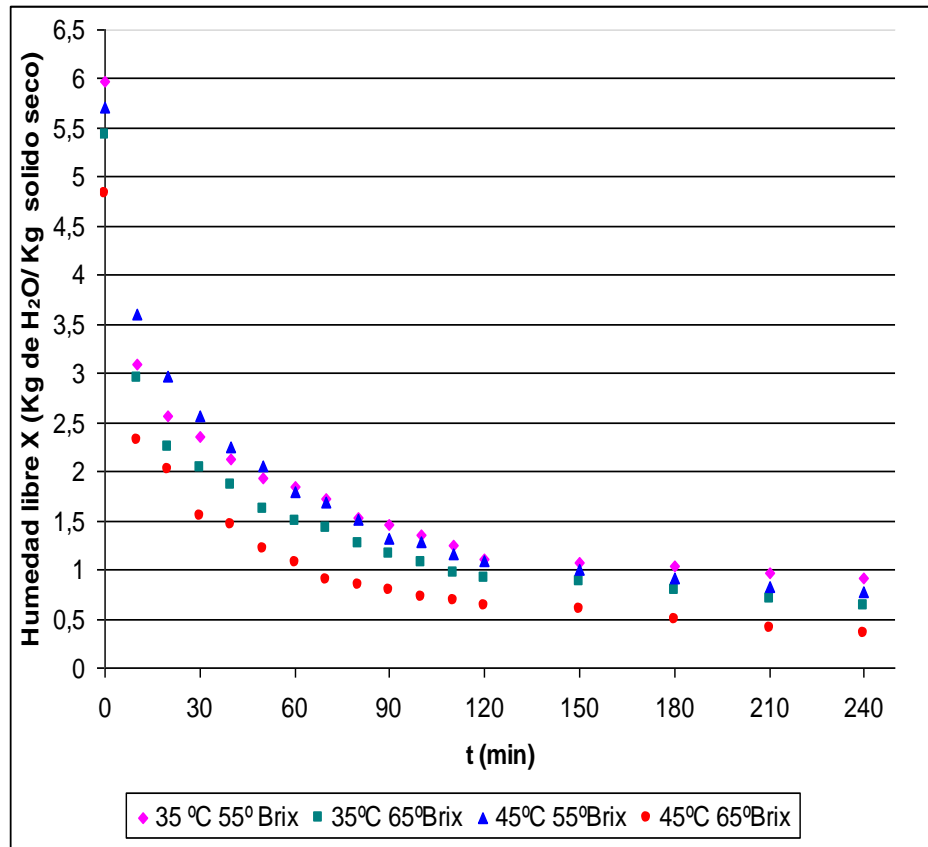
ANEXOS

ANEXO A

PATRÓN DE COLOR UTILIZADO EN LOS EXPERIMENTOS.

ANEXO B

GRÁFICO DE HUMEDAD LIBRE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIÓN ATMÓSFERICA DEL MANGO



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO C

VELOCIDADES DE PÉRDIDA DE AGUA EN LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIÓN ATMOSFERICA DE MANGO

t (min)	V_w 35° C 55° Brix g de H₂O/ g de sólido seco h	V_w 35° C 65° Brix g de H₂O/ g de sólido seco h	V_w 45° C 55° Brix g de H₂O/ g de sólido seco h	V_w 45° C 65° Brix g de H₂O/ g de sólido seco h
10	17.23	14,934	12,696	15,096
20	3,150	4,158	3,78	1,8
30	1,290	1,278	2,442	2,856
60	0,870	1,14	1,506	0,99
90	0,786	0,678	0,948	0,558
120	0,696	0,51	0,492	0,306
180	0,084	0,12	0,174	0,132
240	0,120	0,156	0,132	0,138

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO D

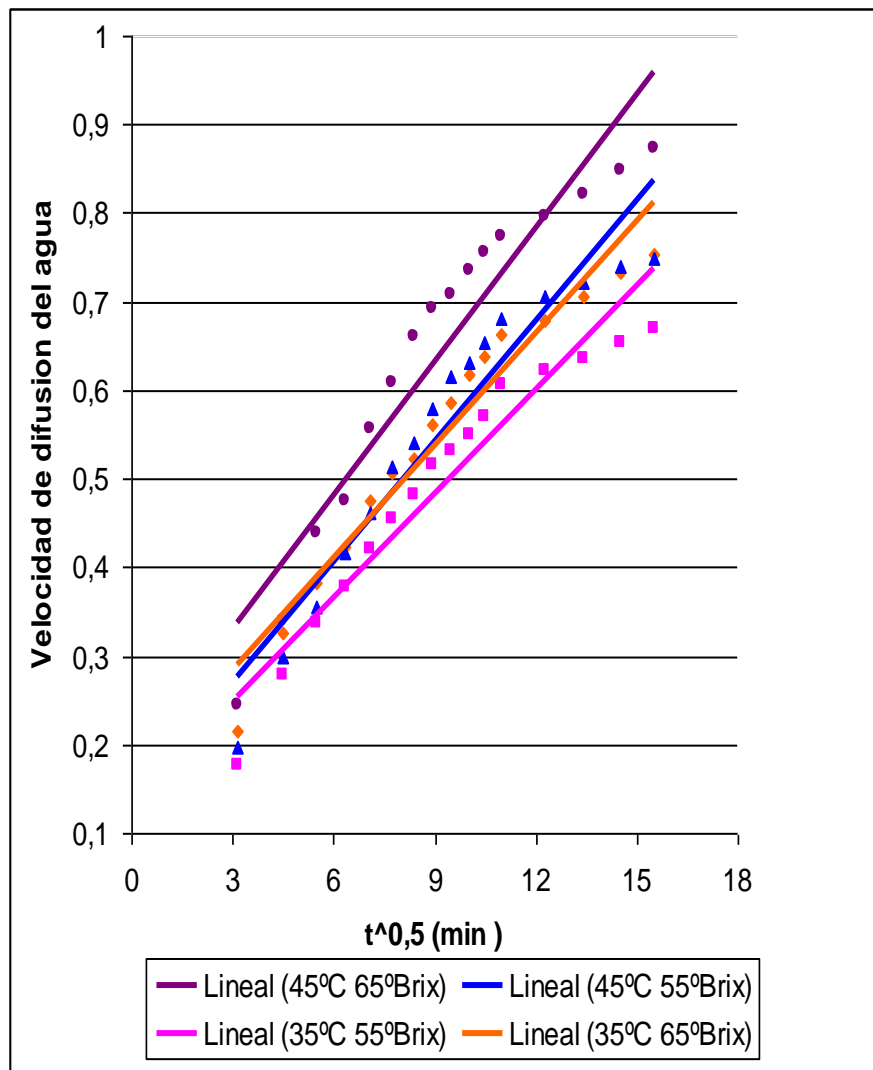
VELOCIDADES DE GANANCIA DE SÓLIDOS EN LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION ATMOSFERICA DE MANGO

<i>t</i> (min)	<i>V_{SG}</i> 35° C 55° B g/h	<i>V_{SG}</i> 35° C 65° B g/h	<i>V_{SG}</i> 45° C 55° B g/h	<i>V_{SG}</i> 45° C 65° B g/h
10	0,618	0,522	0,282	0,678
60	0,036	0,072	0,054	0,048
120	0,06	0,042	0,024	0,012
240	0,006	0,012	0,012	0,0042

Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO E

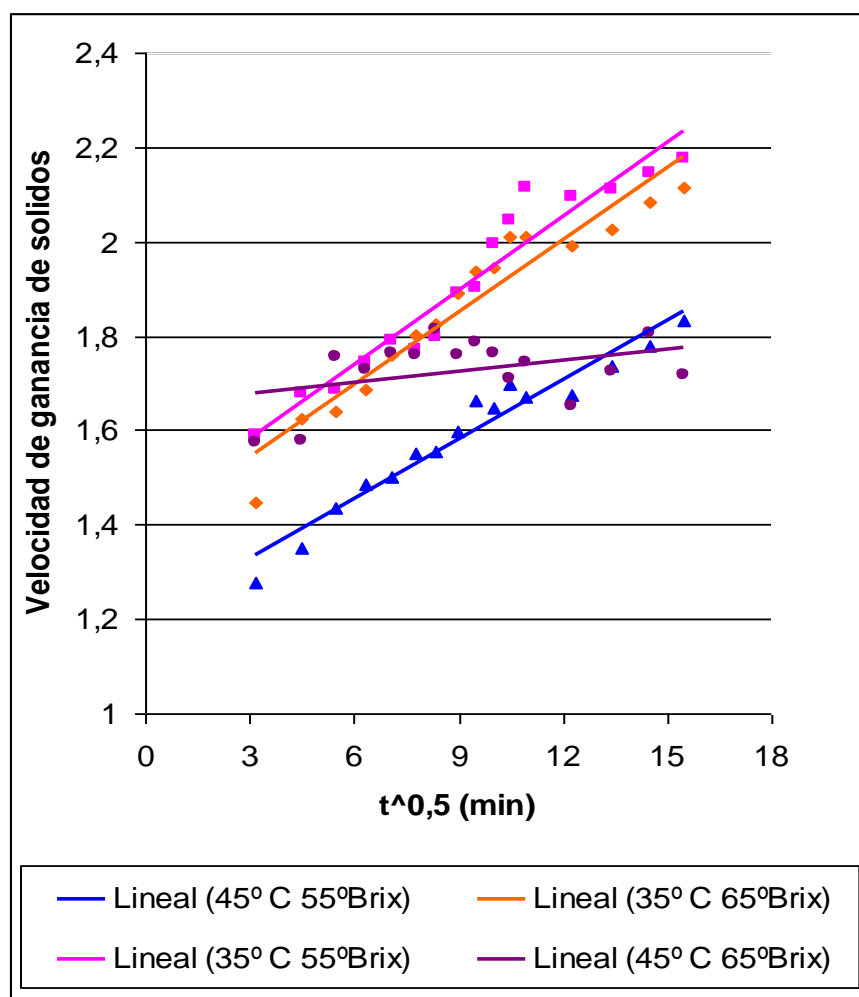
COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DEL AGUA PARA LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO F

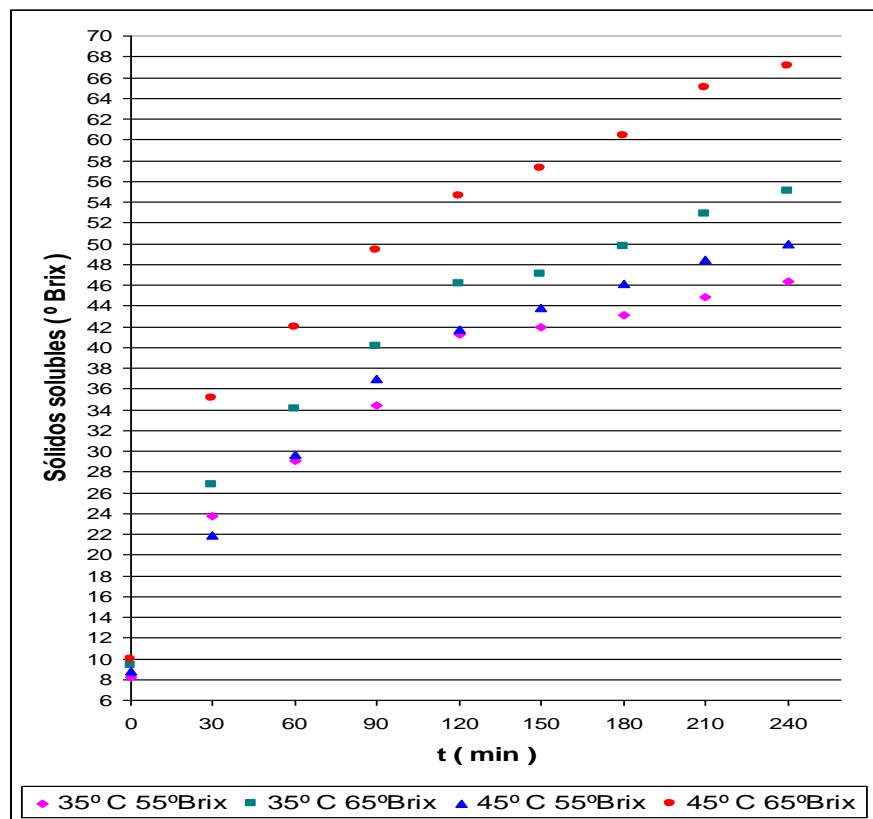
COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE SÓLIDOS PARA LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO G

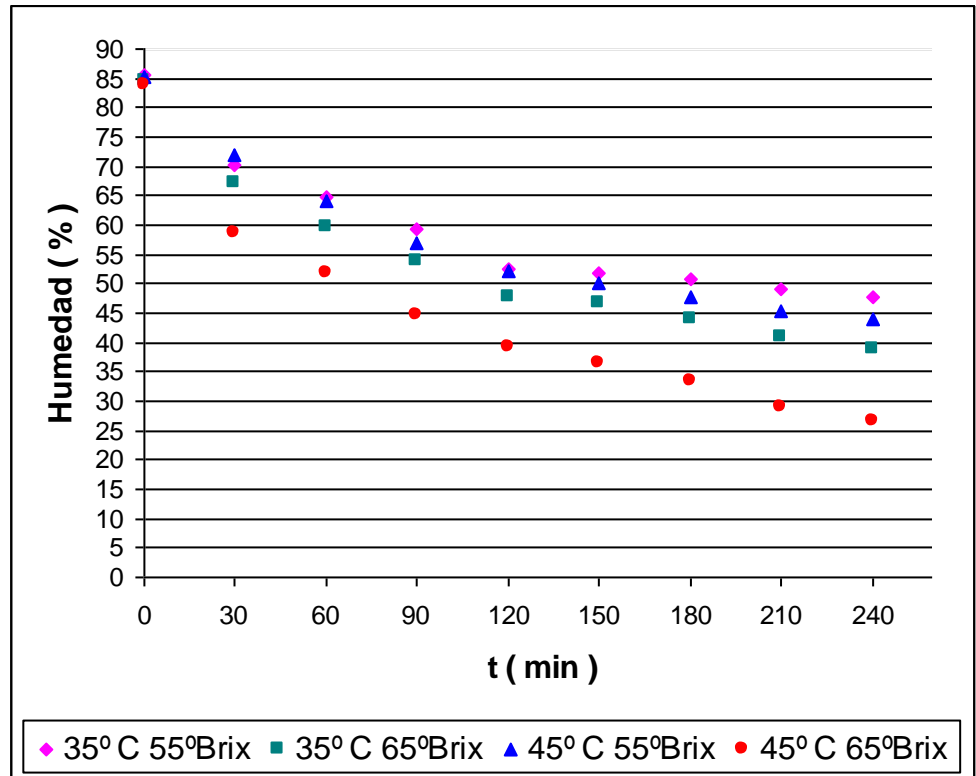
**SÓLIDOS SOLUBLES EN LOS EXPERIMENTOS DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION ATMÓSFERICA
DEL MANGO**



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO H

PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE MANGO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO I

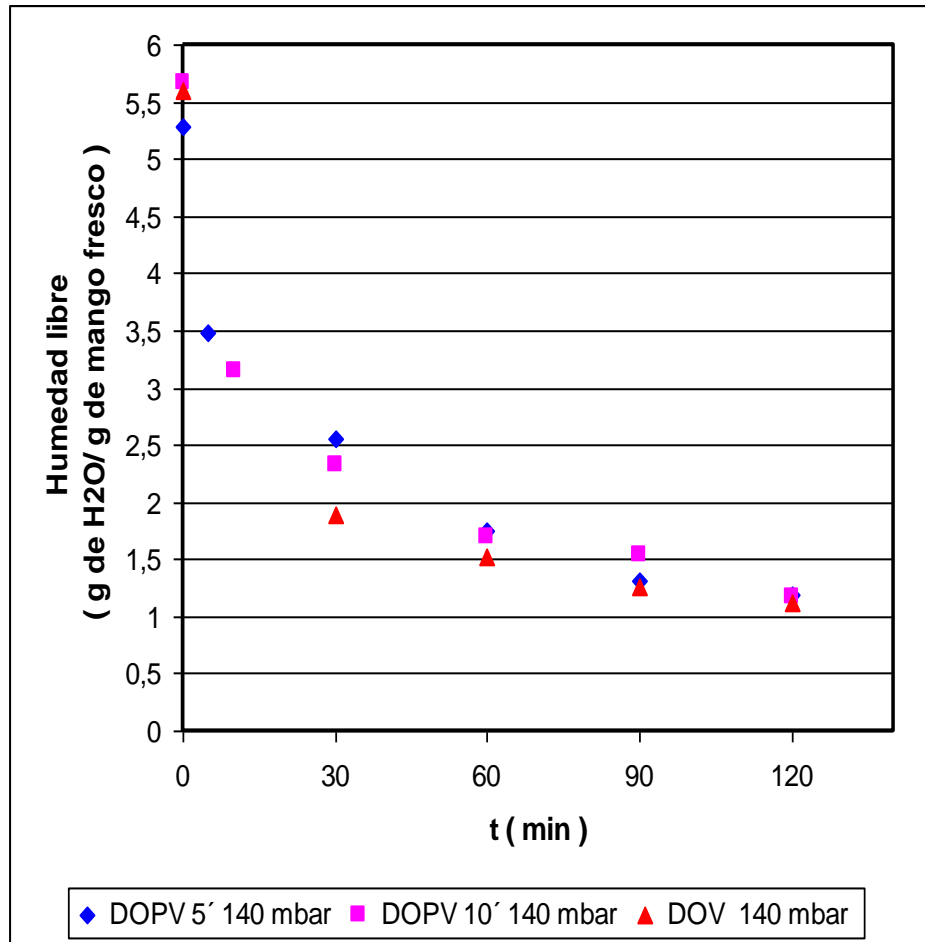
EFFECTO DE LA REDUCCION DE ACTIVIDAD DE AGUA EN LA SUPERVIVENCIA DE MICROORGANISMOS.

Rango de a_w	M.Os generalmente inhibidos por la disminución de a_w en estos rangos
1.00-0.95	<i>Pseudomonas, Escherichia, Proteus, Shigella, Klebsiella, Bacillus, Clostridium perfringens, algunas levaduras.</i>
0.95-0.91	<i>Salmonella, Vibrio parahamolyticus, C botulinum, Serratia, Lactobacillus, Pediococcus, algunos mohos.</i>
0.91-0.87	<i>Muchas levaduras (Candida, Torolopsis, Hansenula, Microoccus.</i>
0.97-0.8	<i>La mayoría de los mohos, Staphylococcus aureus, Sacharomyces spp.</i>
0.80-0.75	<i>La mayoría de las bacterias halofílicas,</i>
0.75-0.65	<i>Mohos xerófilos</i>
0.65-0.60	<i>Levaduras osmófilas</i>
Menos de 0.5	<i>No hay proliferación microbiana.</i>

Fuente: MOISTURE SORPTION:PRACTICAL ASPECTS OF ISOTHERM
MEASUREMENT AND USE ()

ANEXO J

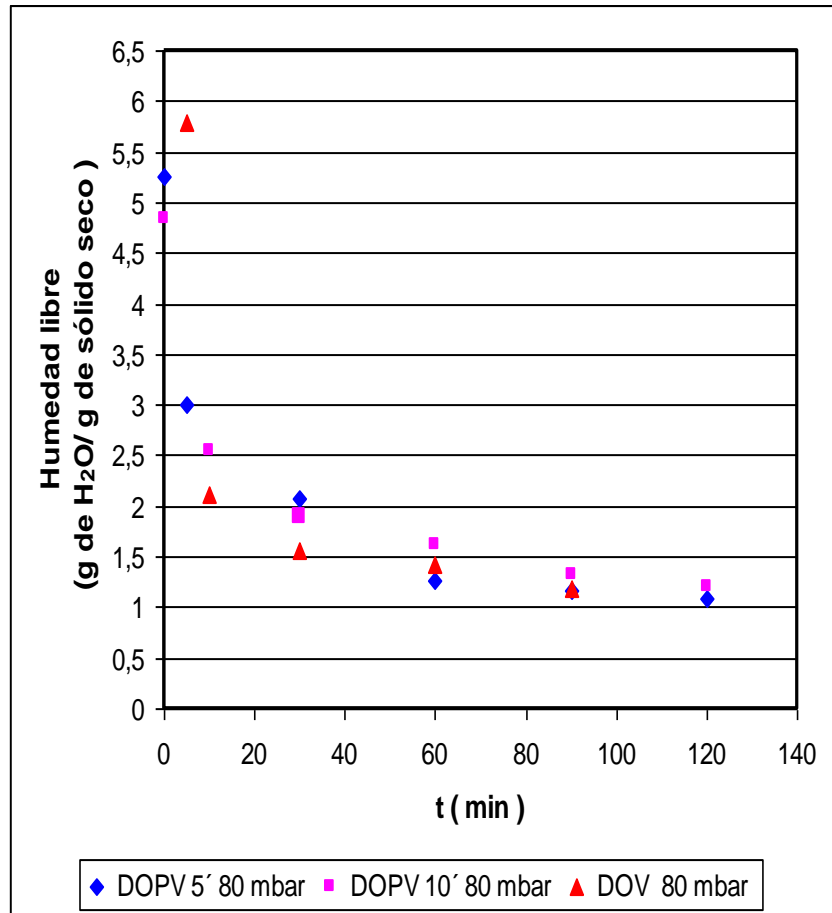
HUMEDAD LIBRE VERSUS EL TIEMPO PARA LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA AL VACÍO DE MANGO A LA PRESIÓN 140 MBAR.



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO K

HUMEDAD LIBRE VERSUS EL TIEMPO PARA LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA AL VACÍO DE MANGO A LA PRESIÓN DE 80 MBAR



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO L

VELOCIDADES DE PÉRDIDAS DE AGUA PARA LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA AL VACÍO DE MANGO

Presión 140 mbar			
t min	V_w g de H₂O/ g de sólido seco h	V_w g de H₂O/ g de sólido seco h	V_w g de H₂O/ g de sólido seco h
	DOPV 5´	DOPV 10´	DOV
5	21,74		
10		15,2	
30	2.214	2,47	7,4
60	1,60	1,25	0,76
90	0.87	0.6	0.504
120	0.264	0.6	0.288

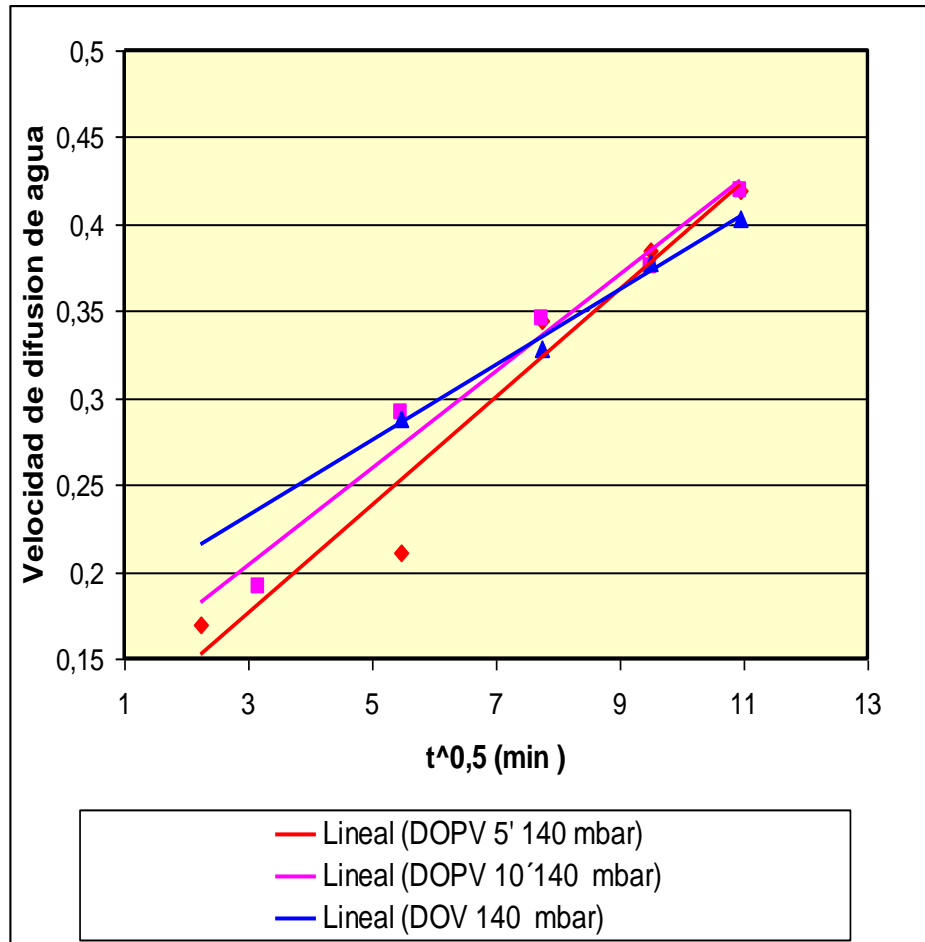
Elaborado por Elizabeth Huayamave L.

Presión 80 mbar.			
t (min.)	V_w g de H₂O/ g de sólido seco h	V_w g de H₂O/ g de sólido seco h	V_w g de H₂O/ g de sólido seco h
	DOPV 5´	DOPV 10´	DOV
5	26.94		
10		13.686	
30	3.792	1.974	7.344
60	0.33	0.546	1.11
90	0.216	0.588	0.246
120	0.198	0.264	0.678

Elaborado por Elizabeth Huayamave L.

ANEXO M

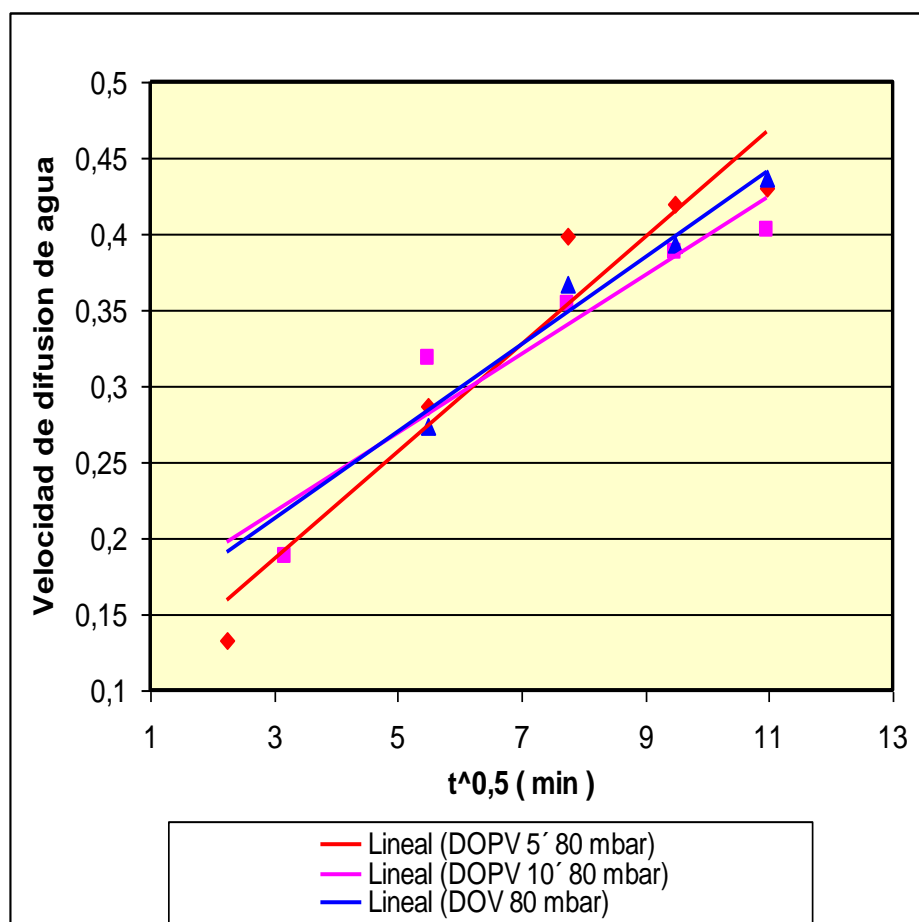
COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DEL AGUA K_w EN LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION DE 140 MBAR



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO N

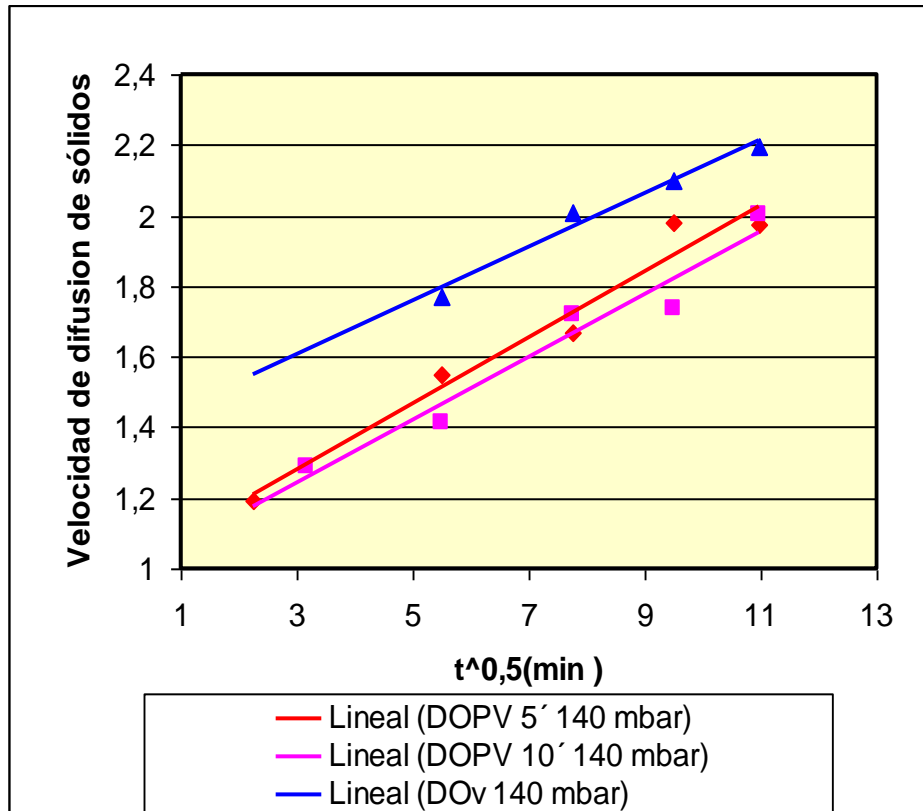
COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DEL AGUA K_w EN LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION DE 80 MBAR



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO O

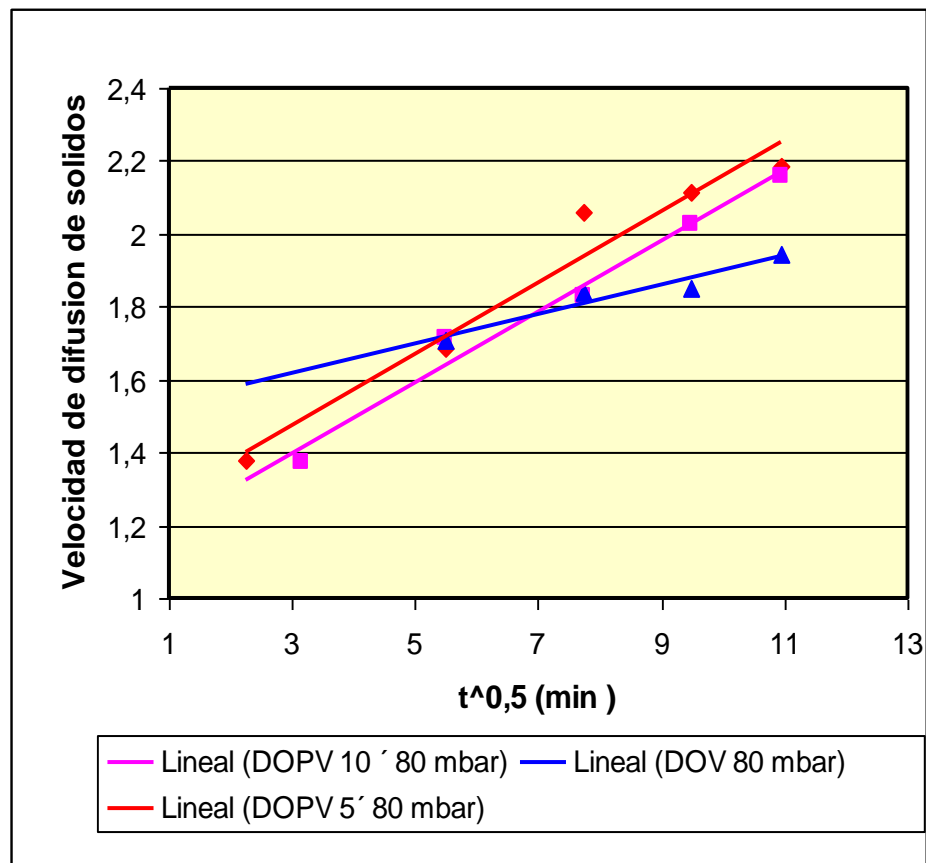
COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE SÓLIDOS K_s EN LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION DE 140 MBAR



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO P

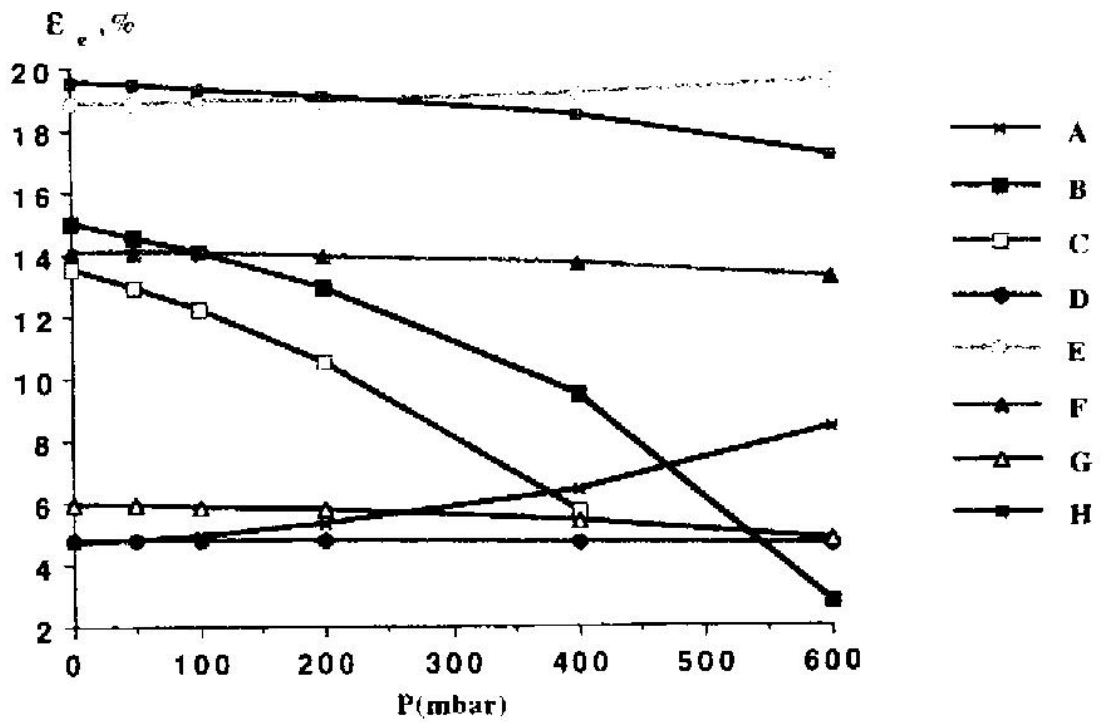
COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE SÓLIDOS K_s EN LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A PRESION DE 80 MBAR



Elaborado por: Elizabeth Huayamave L.

ANEXO Q

POROSIDAD EFECTIVA PARA DISTINTAS FRUTAS.



A: Manzana.

B: Plátano.

C: Mango

D: Pera

E: Melocotón

F: Piña

G: Papaya

H: Albaricoque.

Fuente: Modelling of vacuum osmotic dehydration of Food.(5) .

ANEXO S

TABLA PARA ESTIMAR LAS PROPIEDADES DE LOS ALIMENTOS

Table 2 Thermal Property Models

a. Major food components				
Thermal property	Major component	Group model temperature function	Standard error	Standard % error
k(W/m·°C)	Protein	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$	0.012	3.91
	Fat	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-3}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$	0.0032	1.95
	Carbohydrate	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.5874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$	0.0134	3.42
	Fiber	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$	0.0127	5.55
	Ash	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$	0.0083	2.15
α (m ² /s)	Protein	$\alpha = 6.8714 \times 10^{-2} + 4.7578 \times 10^{-4}T - 1.4646 \times 10^{-6}T^2$	0.0038	4.30
	Fat	$\alpha = 9.8777 \times 10^{-2} - 1.2569 \times 10^{-4}T - 3.8286 \times 10^{-8}T^2$	0.0020	2.15
	Carbohydrate	$\alpha = 8.0842 \times 10^{-2} + 3.3032 \times 10^{-4}T - 2.3218 \times 10^{-6}T^2$	0.0058	5.84
	Fiber	$\alpha = 7.3976 \times 10^{-2} + 5.1902 \times 10^{-4}T - 2.2202 \times 10^{-6}T^2$	0.0026	3.14
	Ash	$\alpha = 1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4}T - 1.2244 \times 10^{-6}T^2$	0.0022	1.61
ρ (kg/m ³)	Protein	$\rho = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}T$	39.9501	3.07
	Fat	$\rho = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}T$	4.2554	0.47
	Carbohydrate	$\rho = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}T$	93.1249	5.93
	Fiber	$\rho = 1.3115 \times 10^3 - 3.6389 \times 10^{-1}T$	8.2687	0.64
	Ash	$\rho = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}T$	2.2315	0.09
C _p (kJ/kg °C)	Protein	$C_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$	0.1147	5.57
	Fat	$C_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$	0.0236	1.16
	Carbohydrate	$C_p = 1.5488 + 1.5625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$	0.0986	5.96
	Fiber	$C_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$	0.0293	1.66
	Ash	$C_p = 1.0926 + 1.8596 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$	0.0296	2.47

Fuente: Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. (29)

ANEXO T

VISCOSIDAD DE LAS SOLUCIONES DE SACAROSA

Viscosidad en centipoises

Temp., °C	% de sacarosa, en peso			Temp., °C	% de sacarosa, en peso		
	20	40	60		20	40	60
0	3.818	14.82		50	0.974	2.506	14.06
5	3.166	11.60		55	0.887	2.227	11.71
10	2.662	9.830	113.9	60	0.811	1.989	9.87
15	2.275	7.496	74.9	65	0.745	1.785	8.37
20	1.967	6.223	56.7	70	0.688	1.614	7.18
25	1.710	5.206	44.02	75	0.637	1.467	6.22
30	1.510	4.398	34.01	80	0.592	1.339	5.42
35	1.336	3.776	26.62	85	0.552	1.226	4.75
40	1.197	3.261	21.30	90	1.127	4.17
45	1.074	2.858	17.24	95	1.041	3.73

* *International Critical Tables*, vol. 5, p. 23, Bingham y Jackson, *Bur. Standards Bull.* 14, p. 59, 1919.

Fuente: Manual del Ingeniero Químico (24).

ANEXO U

GRAFICO PARA HALLAR EL FACTOR JH

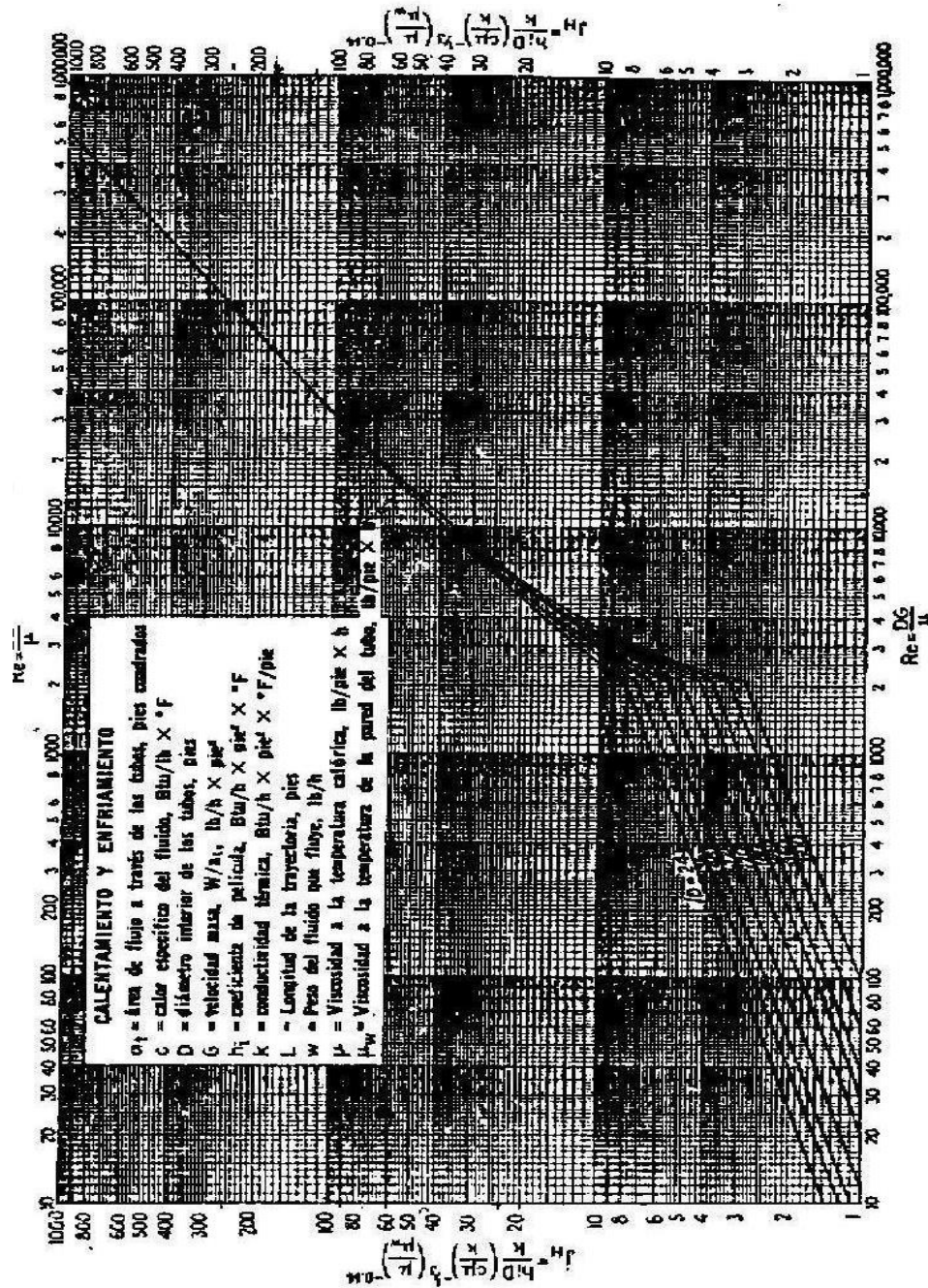


FIG. 24. Curva de transferencia de calor lado de tubos. (Adaptada de Sieder y Tate)

Fuente: Procesos de transferencia de calor (17)

ANEXO V

TABLA DE FACTORES DE OBSTRUCCIÓN

Temperatura del medio calefactor	Hasta 240°F		240-400°F †	
Temperatura del agua	125°F o menos		Más de 125°F	
Agua	Velocidad del agua, pps		Velocidad del agua, pps	
	3 pies o menos	Más de 3 pies	3 pies o menos	Más de 3 pies
Agua de mar	0.0005	0.0005	0.001	0.001
Salmuera natural	0.002	0.001	0.003	0.002
Torre de enfriamiento y tanque con rocío artificial:				
Agua de compensación tratada	0.001	0.001	0.002	0.002
Sin tratar	0.003	0.003	0.005	0.004
Agua de la ciudad o de pozo (como Grandes Lagos)	0.001	0.001	0.002	0.002
Grandes Lagos	0.001	0.001	0.002	0.002
Agua de río:				
Mínimo	0.002	0.001	0.003	0.022
Mississippi	0.003	0.002	0.004	0.003
Delaware, Schykill	0.003	0.002	0.004	0.003
East River y New York Bay	0.003	0.002	0.004	0.003
Canal sanitario de Chicago	0.008	0.006	0.010	0.008
Lodosa o turbia	0.003	0.002	0.004	0.003
Dura (más de 15 granos/gal)	0.003	0.003	0.005	0.005
Enfriamiento de máquinas	0.001	0.001	0.001	0.001
Destilada	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
Alimentación tratada para calderas	0.001	0.0005	0.001	0.001
Purga de calderas	0.002	0.002	0.002	0.002

† Las cifras de las últimas dos columnas se basan en una temperatura del medio calefactor de 240 a 400°F. Si la temperatura de este medio es mayor de 400°F, y si se sabe que el medio enfriador forma depósitos, estas cifras deben modificarse convenientemente.

Fuente: Manual del Ingeniero Químico (24).