



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO Y PROPUESTA DE PROCESO DE
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y CONVECTIVA DEL
PLÁTANO TABASCO (*Musa paradisiaca* L.)**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTAN

**ANDREA DENISSE CISNEROS ROJAS
IRENE LICEA CIRIACO**



CD. MX.

2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: **TECANTE CORONEL ALBERTO**
VOCAL: Profesor: **LOPEZ CERVANTES JOSE LUIS**
SECRETARIO: Profesor: **RODRIGUEZ CASTAÑEDA ILEANA**
1er SUPLENTE: Profesor: **GARCIA ARRAZOLA ROEB**
2o SUPLENTE: Profesor: **RAMIREZ CARRILLO REBECA**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio L-313, CONJUNTO E, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

Dr. ALBERTO TECANTE CORONEL

ASESOR TÉCNICO:

REBECA RAMIREZ CARRILLO

SUSTENTANTES:

**ANDREA DENISSE CISNEROS
ROJAS**

IRENE LICEA CIRIACO

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.....	3
INTRODUCCIÓN.....	5
CAPÍTULO I.....	6
ANTECEDENTES.....	6
1 Plátano.....	7
1.1 Características del plátano.....	7
1.2 Composición química.....	8
1.3 Maduración del plátano.....	9
1.3.1 Cambio de sabor.....	9
1.3.2 Cambio de aroma.....	10
1.3.3 Cambio de textura.....	10
1.3.4 Cambios de color.....	10
1.4 Consumo en fresco e industrialización.....	11
1.5 Variedades que se cultivan.....	12
2 Oscurecimiento enzimático.....	12
2.1 Inhibición de la polifenoloxidasa.....	13
3 Deshidratación.....	14
3.1 Generalidades sobre la deshidratación.....	14
3.2 Descripción general del proceso de secado.....	15
3.2.1 Tipos de migración de humedad.....	16
3.3 Deshidratación por convección de aire caliente.....	17
3.3.1 Factores que influyen en el secado convectivo.....	18
3.4 Deshidratación osmótica.....	19
3.4.1 Ventajas y desventajas de la deshidratación osmótica.....	22
3.5 Proceso de secado por métodos combinados: Deshidratación osmótica como pretratamiento al secado por aire.....	23
3.6 Deshidratación combinada.....	24
CAPÍTULO 2.....	26
OBJETIVOS.....	26
1 Objetivo general.....	27
1.1 Objetivos particulares.....	27

CAPÍTULO 3	28
MATERIALES Y MÉTODOS	28
1 Cuadro metodológico.....	29
2 Materiales y métodos	30
CAPÍTULO 4	35
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	35
1 Resultados y análisis	36
1.1 Diseño del proceso	43
1.1.1 Esquema general del proceso.....	43
1.1.2 Deshidratación por ósmosis	44
1.1.3 Deshidratación convectiva	47
CAPÍTULO 5	57
CONCLUSIONES	57
Conclusiones	58
Recomendaciones	60
Referencias	61
ANEXOS	63
ANEXO 1: Gráficas representantes del comportamiento de secado para 45 °Bx a diferentes temperaturas.....	64
ANEXO 2: Análisis estadístico	66
ANEXO 3: Cuestionario de evaluación sensorial	69
ANEXO 4: Tablas y gráficas para la medición de %WL	70
ANEXO 5: Gráficas para el modelo de Peleg y la ecuación de Hawkes y Flink	71

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PLÁTANO.....	8
TABLA 2. CONDICIONES DE SECADO COMBINADO CON PRETRATAMIENTO PARA REBANADAS DE PLÁTANO.....	32
TABLA 3. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA DOS MODELOS DE DO A DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN, CON PRETRATAMIENTO EN TREHALOSA.....	47
TABLA 4. CALOR CALCULADO A 70 Y 90 °C.....	51
FIGURA 1. ETAPAS DE MADURACIÓN DEL PLÁTANO.....	11
FIGURA 2. VARIEDADES DE PLÁTANO CULTIVADAS EN MÉXICO.....	12
FIGURA 3. GRÁFICA DE PÉRDIDA DE HUMEDAD TEÓRICA.....	17
FIGURA 4. CINÉTICA DE SECADO.....	18
FIGURA 5. METODOLOGÍA DE DESHIDRATACIÓN.....	29
FIGURA 6. CARACTERIZACIÓN DEL PLÁTANO.....	29
FIGURA 7. CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL EN EL DESHIDRATADO DE PLÁTANO TABASCO MEDIANTE SECADO OSMÓTICO Y CONVECTIVO A 70 °C.....	36
FIGURA 8. CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL EN EL DESHIDRATADO DE PLÁTANO TABASCO MEDIANTE SECADO OSMÓTICO Y CONVECTIVO A 90 °C.....	36
FIGURA 9. PÉRDIDA DE MASA MEDIANTE SECADO OSMÓTICO A 25 °Bx Y 70 °C, CON UN PRETRATAMIENTO CON TREHALOSA.....	37
FIGURA 10. PÉRDIDA DE MASA MEDIANTE SECADO OSMÓTICO A 25 °Bx Y 90 °C, CON UN PRETRATAMIENTO CON TREHALOSA.....	37
FIGURA 11. PÉRDIDA DE MASA MEDIANTE SECADO CONVECTIVO A 90 °C.....	38
FIGURA 12. PÉRDIDA DE MASA MEDIANTE SECADO CONVECTIVO A 70 °C.....	38
FIGURA 13. RESULTADOS DE LA PREGUNTA: ¿QUÉ TANTO LE AGRADA EL PRODUCTO VISUALMENTE?.....	40
FIGURA 14. RESULTADOS DE LA PREGUNTA: ¿CONSIDERA QUE EL PRODUCTO TIENE UN OLOR AGRADABLE?.....	41
FIGURA 15. RESULTADOS DE LA PREGUNTA: ¿QUÉ TANTO CONSIDERA QUE SE CONSERVA EL SABOR NATURAL DEL PRODUCTO?	41
FIGURA 16. RESULTADOS DE LA PREGUNTA: ¿QUÉ TANTO LE GUSTA EL SABOR DEL PRODUCTO?	42
FIGURA 17. RESULTADOS DE LA PREGUNTA: ¿QUÉ TAN CROCANTE LE PARECE EL PRODUCTO?	42
FIGURA 18. ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO.....	43
FIGURA 19. ESQUEMA DEL BALANCE DE MATERIA A 90 °C.....	48
FIGURA 20: ESQUEMA DEL BALANCE DE ENERGÍA A 90 °C.....	50
FIGURA 21. GRÁFICA DE LA OPERACIÓN DE DESHIDRATACIÓN CONVECTIVA A 70 °C, PRETRATAMIENTO CON TREHALOSA Y DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A 25 °Bx.....	52
FIGURA 22. GRÁFICA DE LA OPERACIÓN DE DESHIDRATACIÓN CONVECTIVA A 90 °C, PRETRATAMIENTO CON TREHALOSA Y DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA A 25 °Bx.....	53
FIGURA 23. PRIMERA CURVA DE SECADO PARA DO A 25 °Bx, CON PRETRATAMIENTO CON TREHALOSA Y SECADO CONVECTIVO A 70 °C.....	54
FIGURA 24. SEGUNDA CURVA DE SECADO PARA DO A 25 °Bx, CON PRETRATAMIENTO CON TREHALOSA Y SECADO CONVECTIVO A 70 °C.....	55
FIGURA 25. PRIMERA CURVA DE SECADO PARA DO A 25 °Bx, CON PRETRATAMIENTO CON TREHALOSA Y SECADO CONVECTIVO A 90 °C.....	55
FIGURA 26. SEGUNDA CURVA DE SECADO PARA DO A 25 °Bx, CON PRETRATAMIENTO CON TREHALOSA Y SECADO CONVECTIVO A 90 °C.....	56

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue diseñar un proceso en tres etapas para deshidratar plátano tabasco (*Musa paradisiaca* L) para obtener un producto que conservase las propiedades sensoriales del plátano. Para obtener el producto deseado, el proceso se dividió en tres partes. Primero se previno el oscurecimiento enzimático usando tres diferentes sustancias a una concentración constante. Después, se deshidrató de manera osmótica con disoluciones hipertónicas de 25, 35 y 45 °Bx a temperatura ambiente y se seleccionó la concentración que produjo la mayor transferencia de masa entre el producto y la disolución. La selección se basó en el cambio con el tiempo de la concentración de sólidos solubles en el plátano y en la disolución y la masa de la muestra a lo largo de la operación. Finalmente, se deshidrató por secado convectivo con aire caliente a 70 y 90 °C con una velocidad constante de entrada de aire 2 m/s; se definió la temperatura que permitió secar de manera más rápida y eficiente.

La deshidratación osmótica contribuyó con aproximadamente 10 % del secado total y el resto del agua se eliminó durante el secado convectivo. La operación a altas temperaturas y bajas concentraciones de disolución hipertónica produjo los mejores resultados sin afectar el tipo de pretratamiento usado. En consecuencia, la propuesta cumple con el objetivo del proyecto.

INTRODUCCIÓN

El plátano, por su capacidad de adaptación a diferentes condiciones adversas, es uno de los frutos con mayor distribución en México. El plátano se cultiva en dieciséis Estados. Los principales son: Chiapas, Tabasco, Veracruz y Colima. Generalmente, los alimentos con mayor contenido de humedad son los más perecederos, de tal manera que el control de la humedad en un producto es un medio para su conservación. Uno de estos medios es la deshidratación, que consiste en eliminar agua de los tejidos para impedir el crecimiento de microorganismos. Los alimentos deshidratados mantienen gran parte de su valor nutricional y de su sabor original.

La deshidratación osmótica es una técnica de deshidratación parcial de alimentos que consiste en su inmersión en disoluciones acuosas de solutos que crean una alta presión osmótica. El uso de la deshidratación osmótica en la industria alimentaria como tratamiento previo contribuye a mejorar el color, el sabor y la textura del producto con un mínimo requerimiento energético dado que se lleva a cabo a temperaturas no lejanas a la de ambiente.

El secado combinado, i.e. convección con aire caliente, seguido del tratamiento previo por deshidratación osmótica, tiene la ventaja de permitir mayores velocidades de secado y conservar las propiedades sensoriales del producto en relación con el secado convectivo con aire caliente solamente.

El proyecto desarrollado consistió en deshidratar plátano (*Musa paradisiaca* L.) para obtener las condiciones de operación más adecuadas y así diseñar el proceso de deshidratación con el propósito de obtener un producto atractivo para el consumidor que permita ampliar el mercado de comercialización de la fruta.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1 PLÁTANO

El plátano tiene su origen en Asia meridional, y es conocido desde el año 650. La especie llegó a las Islas Canarias en el siglo XV y se introdujo en el Continente Americano en 1516. Su cultivo comercial se inició a finales del siglo XIX y principios del XX (Secretaría de Economía, 2012).

El plátano es el principal cultivo de las regiones cálidas del país, como: Chiapas, Tabasco, Veracruz, Jalisco y Colima, de donde se distribuye al resto de la República Mexicana. A su vez, constituye una parte esencial en la dieta diaria de los habitantes del país.

Los plátanos se cosechan durante todo el año, sin embargo, su abundancia depende de la estación. Es por eso, que se decidió trabajar con este fruto, al siempre estar disponible.

1.1 CARACTERÍSTICAS DEL PLÁTANO

El pseudotallo del platanal mide de 2 a 5 m, y su altura puede alcanzar hasta 8 m con las hojas. Es una planta estolonífera, con hojas erguidas, oblongas de 1 a 2 m de largo por 30 cm de ancho, redondeadas en el ápice y en la base (Hernández & Vit, 2009). El fruto tiene forma oblonga, alargada y algo curvada, llega a medir de 20 a 40 cm de largo y 4 a 7 cm de diámetro. Existen distintas variedades que van desde las más grandes como el plátano macho, que llega a tener una masa de 200 g cada uno, hasta los más pequeños como el plátano dominico, cuya masa varía entre los 100 y 120 g. El color de la cáscara de los frutos puede ser amarillo verdoso, amarillo, amarillo-rojizo o rojo (Secretaría de Economía, 2012). La composición química del plátano al momento de la cosecha es 66.2 % de humedad, 0.3 % de grasas, 1.3 % de proteínas, 1.1 % de fibra, 0.8 % vitamina y cenizas y 30.7 % de hidratos carbono (Quiceno et al., 2014).

1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

El almidón es el hidrato de carbono predominante en el fruto verde, mientras en el estado maduro hay mayor contenido de azúcares invertidos. La pulpa del fruto tiene bajas concentraciones de fibra que permanece constante durante la maduración. El ácido málico es el predominante y en menor proporción el cítrico y el oxálico cuyos niveles aumentan de 0.7 a 1.5 % con el paso del estado verde al maduro. La pulpa del plátano es susceptible al pardeamiento cuando se expone al oxígeno. Este fenómeno está relacionado con los niveles de antioxidantes, como son los polifenoles. El pardeamiento enzimático en los tejidos ha sido atribuido a la actividad de la polifenol oxidasa (PFO) responsable del desarrollo de un color café por oxidación de los polifenoles. La concentración de estos últimos es menor en la pulpa verde y aumenta en el estado sobre maduro debido a la pérdida de actividad de la polifenol - oxidasa (Quiceno et al., 2014). La *Tabla 1* muestra la composición química del plátano (USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Mayo 2016).

Tabla 1. Composición química del plátano.

Agua (g)		74.91
Proteínas (g)		1.09
Lípidos (g)		0.33
Hidratos de Carbono	Total (g)	22.84
	Fibras (g)	2.6
Vitaminas	A (IU)	64
	B1 (mg)	
	B2 (mg)	0.031
	B3 (mg)	0.073
	B4 (mg)	0.665
	B5 (mg)	0.334
	B6 (mg)	0.367
Sales Minerales	C (mg)	8.7
	Sodio (mg)	1
	Potasio (mg)	358
	Calcio (mg)	5
	Magnesio (mg)	27
	Manganeso (mg)	0.27
	Hierro (mg)	0.26
Calorías (kcal)	Cobre (mg)	0.078
	Fosforo (mg)	22
Calorías (kcal)		89
Azúcares	Total (g)	12.23
*Por cada 100 g de muestra		

1.3 MADURACIÓN DEL PLÁTANO

Durante la maduración el fruto sufre una serie de cambios fisicoquímicos, bioquímicos y metabólicos que resultan en características sensoriales óptimas para el consumo. De acuerdo con Moreno Ordóñez (2005) la maduración puede dividirse en tres etapas: madurez fisiológica, madurez sensorial y senescencia.

La madurez fisiológica es la etapa de desarrollo del plátano en la que se produce su máximo crecimiento y maduración después de que ha sido cosechado. En cambio, la madurez sensorial se alcanza cuando el fruto obtiene su máximo sabor y aroma, que lo hace apto para el consumo humano. Finalmente, la senescencia es considerada como la etapa catalítica o de envejecimiento de la fruta (Moreno Ordóñez, 2005).

La maduración está marcada por el aumento de las tasas de producción de etileno y dióxido de carbono, así como por la conversión de cantidades relativamente grandes de carbono en forma de almidón en sustancias que alteran la percepción del sabor de la fruta (Moreno Ordóñez, 2005).

1.3.1 Cambio de sabor

Durante la maduración, el almidón, que constituye aproximadamente 80 % de la masa seca de la fruta, se degrada en sacarosa, glucosa y fructosa. Una fracción mucho más pequeña se degrada en compuestos aromáticos, principalmente ésteres, como son acetatos de amilo e isoamilo e isovalerianato de isoamilo, característicos del aroma del plátano. Dependiendo de la variedad, el plátano, contiene inicialmente de 20 a 30 % de almidón y disminuye hasta 1-2 % en el fruto maduro. El contenido de azúcares solubles aumenta de 1 a 20-21 % (Moreno Ordóñez, 2005). Es decir, el almidón se transforma en azúcares solubles, por lo que el contenido de ácidos disminuye y desaparece el sabor agrio y astringente

propio de los frutos no maduros para dar lugar al dulzor típico del plátano listo para el consumo.

1.3.2 Cambio de aroma

Durante la maduración se producen ciertos compuestos volátiles que son los que proporcionan a cada fruta su aroma. Los compuestos volátiles más comúnmente sintetizados durante la maduración de fruto son los ésteres de alcoholes alifáticos y ácidos grasos de cadena corta. La producción de ésteres, responsables del aroma del plátano, empieza inmediatamente después de ocurrir el pico en la actividad respiratoria y aumenta a medida que la demanda de energía requerida para convertir el almidón en azúcares se aproxima a cero (Moreno Ordóñez, 2005).

La formación de aromas depende en gran medida de factores externos, tales como la temperatura y sus variaciones entre el día y la noche. Por ejemplo, en plátanos con un ritmo día/noche de 30/20 °C, se producen 60 % más de compuestos volátiles responsables de aroma que a temperatura constante de 30 °C (Moreno Ordóñez, 2005).

1.3.3 Cambio de textura

La transformación casi total de almidón en azúcares impacta directamente en el sabor y la textura del producto. La degradación de los hidratos de carbono poliméricos, especialmente de las sustancias pécticas y las hemicelulosas, debilita las paredes celulares y la fuerza cohesiva que mantiene unidas las células, lo que resulta en el ablandamiento del fruto (Moreno Ordóñez, 2005).

1.3.4 Cambios de color

La maduración del plátano va ligada con un cambio de color de verde a amarillo. La primera señal del inicio de la maduración es la desaparición del color verde, producido por la degradación de clorofilas. Las principales

causas de este fenómeno son los cambios de pH, el desarrollo de procesos oxidativos y la acción de las clorofilasas. En el caso de este fruto, el color de la cáscara constituye una guía valiosa con respecto a su madurez sensorial (Moreno Ordóñez, 2005). La *Figura 1* muestra las etapas de maduración del plátano (J N Fox & Sons, www.jnfoxandsonsltd.co.uk, 2017).

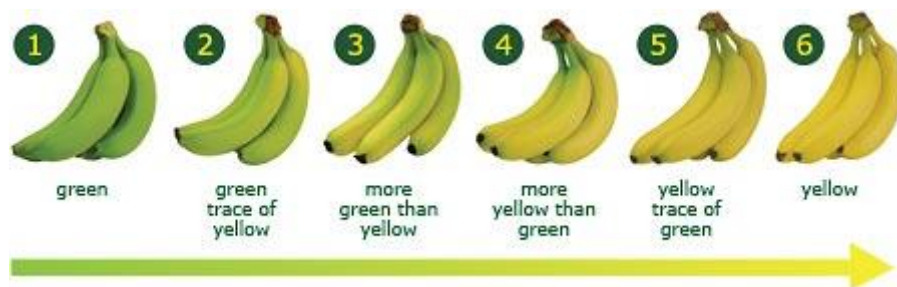


Figura 1. Etapas de maduración del plátano

1.4 CONSUMO EN FRESCO E INDUSTRIALIZACIÓN

Para su consumo en fresco los plátanos deben estar intactos, sin golpes ni magulladura, el color de la cáscara es indicativo del grado de madurez. La fruta no requiere condiciones especiales para su conservación, basta tenerlos en un lugar fresco, seco y protegido de la luz directa del sol (Secretaría de Economía, 2012).

En la industrialización del plátano existen diversas técnicas para su procesamiento en verde, con la finalidad de obtener productos como:

- Harina de plátano (mezclas para concentrado animal)
- Harinas para consumo humano
- Hojuelas de plátano: secas o fritas
- Plátano frito

En México, de acuerdo con datos del estudio Medición de Pobreza 2010, realizado por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), se estima que el consumo diario de plátano tabasco

por habitante en la zona urbana es de 44.7 gramos, mientras que en la zona rural es de 32.5 gramos (Secretaría de Economía, 2012).

1.5 VARIEDADES QUE SE CULTIVAN

La *Figura 2* muestra las variedades de plátano que se cultivan en México (siaprendes, SAGARPA, 2017).

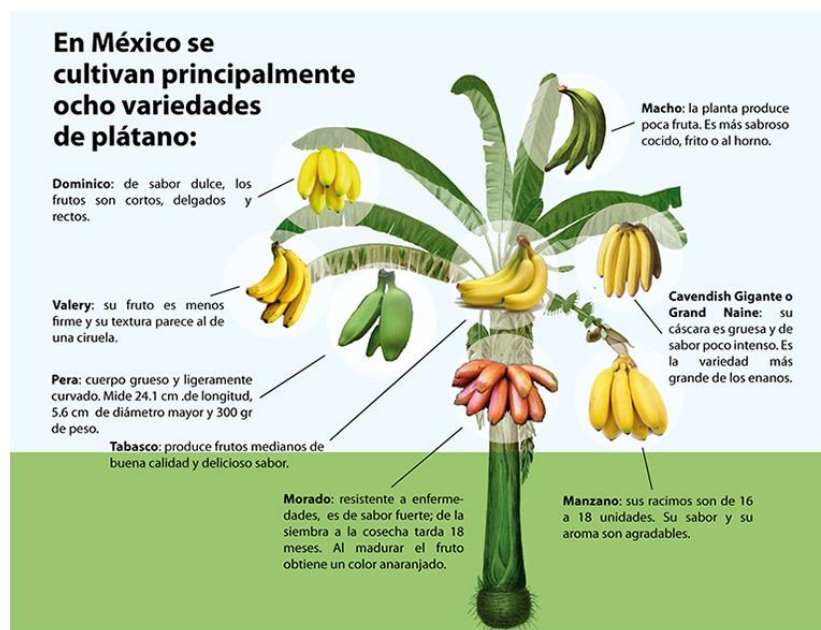


Figura 2. Variedades de plátano cultivadas en México.

2 OSCURECIMIENTO ENZIMÁTICO

El oscurecimiento enzimático se debe a procesos fisiológicos llevados a cabo durante la maduración, a procesos asociados con la recolección, o a tratamientos tecnológicos de post-recolección (Hernández Valdez, 2009). El oscurecimiento enzimático en los tejidos ha sido atribuido a la actividad de la polifenoloxidasa (PFO), una cobre-proteína que actúa en los compuestos fenólicos, causando su oxidación y polimerización con el consecuente desarrollo de un color café. Dado que el color es un atributo importante en los alimentos, un cambio en él puede señalar otras

alteraciones y además reducir la aceptación del consumidor (García et al., 2006). El control natural de la actividad de la polifenoloxidasas es mediante la compactación de los sustratos. La enzima se encuentra en los plastos y cloroplastos, en los vegetales superiores y también en el citoplasma celular, mientras que los compuestos fenólicos que pueden servir de sustratos para esta enzima se acumulan en vesículas. Cuando se rompe la compactación por daño mecánico como el triturado, el corte, la congelación y la descongelación, se puede producir una reacción de oscurecimiento (Aranda González, 2016).

2.1 INHIBICIÓN DE LA POLIFENOLOXIDASA

Existen diferentes métodos para inhibir la polifenoloxidasas y mantener la calidad de frutos y vegetales. Uno de los más usados es la aplicación de inhibidores químicos, los cuales consiguen inactivar los mecanismos no deseados. En principio, la actividad de esta clase de inhibidores implica una interacción directa con la enzima o reacción preferiblemente con el producto que conduce por reacción no enzimática a la formación de pigmentos oscuros. Entre los tipos de inhibidores más usuales están los sulfitos, los agentes antioxidantes o reductores, los acidulantes y los compuestos quelantes (Hernández Valdez, 2009).

Entre los antioxidantes, se han empleado compuestos fenólicos sintéticos como butilhidroxitolueno (BHT) y butilhidroxianisol (BHA), ampliamente empleados en alimentación para proteger el sabor y color de los alimentos y algunos compuestos fenólicos naturales como tocoferol, derivados del ácido cinámico y flavonoides como la quercetina y el kaemferol. Una de las mejores alternativas al uso de los sulfitos es el ácido ascórbico (Wang et al., 2013), este compuesto es altamente efectivo en la inhibición del pardeamiento por su habilidad de reducir las quinonas producidas por la PPO a los fenoles antes de que la reacción de formación de pigmentos

tenga lugar. Otros inhibidores son los compuestos sulfhidrilos como mercaptoetanol, ditiotreitól y tiourea por su habilidad como agentes reductores, sin embargo, las concentraciones necesarias para prevenir el deterioro del fruto no son permitidas en alimentación.

3 DESHIDRATACIÓN

3.1 GENERALIDADES SOBRE LA DESHIDRATACIÓN

Se puede definir a la deshidratación como la operación mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua del producto que la contiene. El agua retirada durante este proceso puede ser eliminada de los alimentos por simples condiciones ambientales o por una variedad de procesos controlados de deshidratación en los que se emplean diferentes medios como calor y aire (Defraeye & Radu, 2017). La deshidratación permite conservar alimentos perecederos, especialmente frutas y hortalizas, cuyo contenido de agua generalmente es superior a 90 %. El objetivo principal es reducir el contenido de humedad de los alimentos, lo cual reduce su actividad enzimática y la capacidad de los microorganismos para desarrollarse en el alimento. La eficiencia de transporte de humedad en el alimento está determinada por la resistencia interna del tejido al movimiento de agua, y una resistencia externa entre la superficie sólida y el fluido deshidratante; aire en la mayoría de los casos. El tiempo y la temperatura son las variables esenciales que modulan la velocidad de movimiento de agua en el alimento.

La deshidratación se acelera conforme aumenta la temperatura, pero los atributos cualitativos iniciales del alimento cambian drásticamente.

Además de la temperatura y el tiempo de deshidratado, el aumento de la superficie de contacto del alimento con el fluido deshidratante también

aumenta la velocidad de movimiento del agua desde el alimento hacia su exterior (Ochoa-Reyes et al., 2012).

3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE SECADO

El secado se describe como un proceso de eliminación de humedad para producir un producto sólido seco o de baja humedad. La humedad se presenta como una disolución líquida contenida en la microestructura del alimento. Cuando un sólido húmedo se seca de manera térmica, ocurren simultáneamente dos procesos:

- Transferencia de energía térmica desde el entorno para evaporar la humedad de la superficie.
- Transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido.

La velocidad de secado está determinada por la velocidad de estos dos procesos. La transferencia de energía térmica desde los alrededores hacia el sólido húmedo puede ocurrir por convección o radiación, y en algunos casos por una combinación de ellos (Cabrera Vázquez, 2004).

Condiciones externas

En relación con el primer proceso, la eliminación de agua en forma de vapor en la superficie del material depende de las condiciones externas como: temperatura, humedad del aire, flujo del aire, área de la superficie expuesta y presión barométrica. Estas condiciones son importantes durante las etapas iniciales de secado, cuando la humedad de la superficie del producto se está eliminando. En algunos materiales puede haber encogimiento después de que se ha removido la humedad inicial. Esto da lugar a grandes gradientes de humedad desde interior hacia la superficie. Este fenómeno puede causar un exceso de secado, y consecuentemente generar tensión dentro del material, dando como resultado agrietamiento y deformación (Cabrera Vázquez, 2004).

Condiciones internas

El movimiento de humedad dentro del sólido es función de su naturaleza física, la temperatura y su contenido de humedad. En una operación de secado cualquiera de estos procesos puede ser el factor que determine la velocidad de secado. A partir de la transferencia de calor hacia un sólido húmedo, un gradiente de temperatura se desarrolla dentro del sólido mientras la evaporación de la humedad ocurre en la superficie. La evaporación produce una migración de humedad desde el interior del sólido hacia la superficie, que ocurre a través de uno o más mecanismos, normalmente, difusión, flujo capilar y presión interna causada por el encogimiento durante el secado (Cabrera Vázquez, 2004).

3.2.1 Tipos de migración de humedad

La migración de humedad toma parte en la fase líquida y gaseosa. Se distinguen los siguientes tipos de humedad:

Transporte de difusión líquida. En este tipo de humedad se asume que la velocidad de transferencia de la humedad líquida es proporcional al gradiente de la concentración de humedad dentro del material.

Transporte por difusión de vapor. Este es el principal mecanismo de transferencia de humedad por vapor en el material. Toma lugar cuando la dimensión característica de los espacios de aire libre es mayor que 10^{-7} m.

Transporte por termodifusión. Es la transferencia de humedad debida al cambio de temperatura en una dirección tomando en cuenta el coeficiente de termodifusión.

Transporte por presión osmótica. La presión osmótica es una función del contenido de humedad del material.

3.3 DESHIDRATACIÓN POR CONVECCIÓN DE AIRE CALIENTE

La deshidratación es una operación compleja que incluye un efecto simultáneo de calentamiento y transferencia de masa (Amami et al., 2017). A su vez es una de las técnicas más antiguamente utilizada para conservar alimentos sin que pierdan sus propiedades sensoriales originales. El secado convectivo es una operación unitaria importante para procesar alimentos altamente perecederos como los productos frescos (Defraeye & Radu, 2017).

Los hornos o secadores de convección por aire están contruidos con un ventilador en su interior, el cual aumenta el movimiento del aire para acelerar la transferencia de calor convectivo y mantener la misma temperatura en todos los sectores del horno. Este tipo de instrumentación mejora la calidad en el secado o deshidratado de alimentos, pero implica un alto consumo energético, por lo que es importante aumentar la eficiencia energética y reducir el tiempo del proceso (Defraeye & Radu, 2017).

El comportamiento de los sólidos en el secado se mide por la pérdida de humedad con el tiempo. Existen tres etapas en el secado. Durante la primera etapa la velocidad de secado es uniforme y la vaporización empieza cuando el contenido de humedad en el sólido llega a la superficie. La *Figura 3* muestra la gráfica de pérdida de humedad teórica.

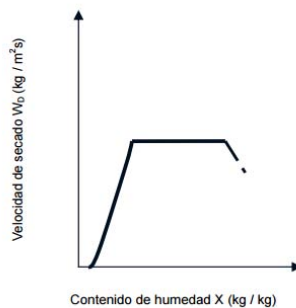


Figura 3. Gráfica de pérdida de humedad teórica.

La segunda etapa está formada por el periodo de secado de la superficie insaturada hasta que el líquido contenido en ella se evapora completamente. Finalmente, en la tercera etapa, el contenido de humedad llega a un punto de equilibrio con la humedad del aire de secado (Ortiz Alfaro, 2003). La *Figura 4* muestra la cinética de secado.

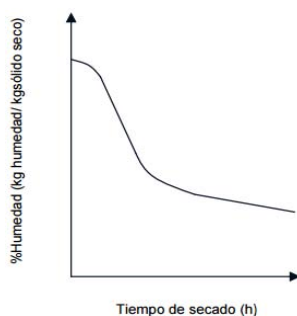


Figura 4. Cinética de secado.

3.3.1 Factores que influyen en el secado convectivo

Área expuesta

Entre mayor sea el área expuesta al aire, la efectividad del secado aumenta, es decir, entre más dividido se encuentre el alimento, el aire caliente tiene mayores posibilidades de penetrar en el alimento y deshidratarlo mejor.

Temperatura del aire

La temperatura es uno de los factores más importantes en el secado convectivo. Entre mayor sea la diferencia de temperaturas entre el medio de transmisión de calor y el alimento, mayor será la velocidad de arrastre de humedad del aire respecto al alimento.

Velocidad del aire

La velocidad del aire es un factor importante ya que entre mayor sea, mayor será su capacidad de extraer humedad.

3.4 DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

No toda el agua que contiene un alimento está disponible para el crecimiento microbiano, parte de ella está ligada a sus componentes. La remoción de agua en trozos de alimentos se realiza con el fin de disminuir la actividad de agua y así inhibir el desarrollo microbiano y las reacciones de deterioro. Una técnica que se utiliza con baja temperatura y sin requerimiento de energía es la denominada deshidratación osmótica (DO) mediante la cual se logra obtener productos de humedad intermedia con muy buena calidad sensorial. En este proceso los alimentos, como frutas y vegetales, son colocados en una disolución concentrada de sólidos solubles en la que ocurre la deshidratación parcial del producto, y simultáneamente se presenta en menor cantidad, la entrada del soluto desde la parte externa hasta el interior del producto. Los solutos que se utilizan en la elaboración de jarabes son de bajo costo y el consumo energético involucrado es mínimo. La pérdida de agua por parte del alimento en el tratamiento osmótico se puede dividir en dos períodos: (1) un período de aproximadamente dos horas, con una alta velocidad de eliminación de agua y (2) un período, desde las dos horas en adelante con una velocidad decreciente de eliminación de agua (Montti Tepper, 1996). La aplicación de estos procesos en la industria de alimentos está todavía restringida debido a que el mecanismo que controla la transferencia de masa a contracorriente no está totalmente claro y no se pueden establecer reglas acerca de las variables que lo afectan (Valera et al., 2005).

Cabe destacar que la DO 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 y otros (Montti Tepper, 1996).

La transferencia de masa ocurre a través de las membranas y paredes celulares. El estado de las membranas celulares puede variar de parcial a totalmente permeables. Durante la remoción osmótica de agua de los alimentos, el frente de deshidratación se mueve desde la superficie que está en contacto con la disolución hacia el interior. El esfuerzo osmótico asociado puede resultar en la desintegración celular. La causa más probable del daño celular puede atribuirse a la reducción de tamaño causada por la pérdida de agua durante la DO, que resulta en la pérdida de contacto entre la membrana celular externa y la pared celular (Della Rocca, 2010).

El transporte de masa en la deshidratación osmótica depende de varios factores:

- *Tipo de agente osmótico*

La naturaleza del agente osmótico es fundamental para definir el comportamiento del producto durante el proceso de deshidratación osmótica. La interacción de los solutos con el agua y la matriz sólida del alimento depende de la naturaleza y las propiedades físicas del agente osmótico; viscosidad, poder depresor de la a_w ¹. La ganancia de sólidos se ve favorecida por los solutos de baja masa molar, lo que facilita su penetración. En la actualidad existe una gran abundancia de agentes osmóticos tales como sacarosa, glucosa, jarabe de maíz, cloruro de sodio, cloruro de potasio y glicerina. En el caso particular de las frutas, el agente osmótico más empleado ha sido la sacarosa debido a su disponibilidad, sabor y aroma (Rodríguez, 2013).

- Concentración de la disolución osmótica

¹ La actividad de agua, a_w , es el cociente de la presión de vapor que ejerce el agua en la disolución y la presión de vapor del agua pura a la temperatura del sistema. En el equilibrio, a_w es igual a la fracción de humedad relativa del aire, $H_R/100$. a_w depende de la composición, la temperatura y la humedad del producto. Puede afectar sus características de calidad, principalmente la textura, el sabor, el color, y el tiempo de conservación.

La pérdida de agua y la velocidad de secado aumentan con el aumento de la concentración de la disolución osmótica ya que la actividad de agua de la disolución decrece. El aumento de la concentración de la disolución provoca la formación de una capa de soluto sobre la superficie del producto y actúa como barrera que reduce la pérdida de nutrientes, y a concentraciones muy grandes pueden dificultar la pérdida de agua. Cuando se utilizan mezclas de sacarosa y sal la fuerza impulsora para la transferencia de masa aumenta al disminuir la actividad de agua de la disolución (Della Rocca, 2010).

- Temperatura de la disolución osmótica

Este parámetro es el más importante porque afecta la cinética de pérdida de agua y la ganancia de solutos. La temperatura tiene un menor efecto sobre la ganancia de solutos ya que a altas temperaturas el soluto no se puede difundir tan fácilmente como el agua a través de la membrana celular de los tejidos de producto.

La temperatura tiene dos efectos. En el primero, su aumento de temperatura favorece la agitación molecular y por consiguiente mejora la velocidad de difusión. El otro efecto es la permeabilidad de la membrana celular con un incremento de la temperatura. La temperatura a la cual se produce la variación en la permeabilidad de la membrana depende de las distintas especies, pero se estima que para productos frutihortícolas está en el intervalo de 50-55 °C aproximadamente (Della Rocca, 2010).

- Agitación de la disolución osmótica

La DO puede mejorarse mediante la agitación porque disminuye la resistencia a la transferencia de masa en la superficie del producto. Además, elimina los gradientes de temperatura y concentración de solutos en la disolución. Sin embargo, en algunos casos puede dañarse el producto y esto debe evitarse (Della Rocca, 2010).

- Presión de operación

La transferencia de agua total en la deshidratación osmótica depende de dos mecanismos: la difusión y el flujo por capilaridad. Los tratamientos al vacío aumentan el flujo capilar y aumentan la transferencia de agua, pero no influyen en la ganancia de solutos. El flujo capilar de agua depende de la porosidad y de la fracción de espacios huecos del producto (Della Rocca, 2010).

- Tiempo

A medida que aumenta el tiempo del proceso, se produce una mayor pérdida de agua y una mayor ganancia de sólidos. Sin embargo, no conviene deshidratar más allá de una pérdida de 50 % de la masa pues la tasa osmótica disminuye con el tiempo. La principal pérdida de agua ocurre durante las primeras dos horas y la mayor ganancia de sólidos los primeros treinta minutos (Montti Tepper, 1996).

3.4.1 Ventajas y desventajas de la deshidratación osmótica.

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Comparada con el secado por aire o liofilización, la eliminación de agua ocurre sin cambio de fase. • La estructura de los alimentos se conserva mejor. • La alta concentración de solutos alcanzada en la parte externa de la pieza contribuye a prevenir el oscurecimiento en muchos productos, evitando así el uso de aditivos químicos como los sulfitos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Después del secado, puede formarse una capa de azúcar que no favorezca la textura de los alimentos. • La oxidación de los productos puede aparecer en pocas semanas como consecuencia de la alta retención de aceites esenciales deteriorando el sabor del producto.

-
- Un pretratamiento de deshidratación osmótica anterior a una operación de secado hace posible reducir el tiempo, y como consecuencia reducir los costos de producción.
 - Las disoluciones osmóticas pueden ser reutilizadas durante ciclos y así disminuir el costo del proceso.

(Rodríguez, 2013)

3.5 PROCESO DE SECADO POR MÉTODOS COMBINADOS: DESHIDRATACIÓN

OSMÓTICA COMO PRETRATAMIENTO AL SECADO POR AIRE

El secado por aire caliente es la técnica más empleada para la conservación de alimentos. Sin embargo, la exposición prolongada a elevadas temperatura provoca cambios físicos, químicos, sensoriales y una disminución en el valor nutricional. El secado por aire caliente como tratamiento térmico único, en todas sus variantes, permite procesar cualquier producto alimenticio para obtener un producto final estable. Sin embargo, produce en los alimentos algunas transformaciones que pueden atender con su calidad final. Entre ellas podemos mencionar: alteraciones en la forma y la textura del producto; composición y estructura no uniforme, cambios de sabor y aroma, modificación del color, degradación de componentes nutricionales, mala capacidad de rehidratación, por mencionar algunos (Della Rocca, 2010). Además de que es un proceso que requiere altos consumos de energía, es deseable que los alimentos por deshidratar sean pretratados antes del proceso para disminuir el consumo de energía y obtener un producto seco de calidad deseada. En la actualidad, la deshidratación osmótica se utiliza como tratamiento

previo a procesos y mejora las propiedades nutricionales, sensoriales y funcionales de los alimentos procesados, sin alterar su integridad.

Mediante la deshidratación osmótica se puede llegar a eliminar hasta 70 % del contenido de agua inicial en el producto, dependiendo de las propiedades de la materia prima, características de la disolución osmótica, condiciones y duración del proceso. La cantidad de agua remanente en el producto no asegura su estabilidad, normalmente la actividad de agua sigue siendo alta. Por otra parte, el pretratamiento osmótico es un proceso que impide que el alimento esté en contacto con el oxígeno del aire y como tratamiento previo al secado por aire caliente ofrece algunas ventajas sobre otros pre-tratamientos convencionales de inactivación enzimática (Della Rocca, 2010).

3.6 DESHIDRATACIÓN COMBINADA

La deshidratación osmótica es una técnica que se aplica principalmente a alimentos con alta humedad como frutas y vegetales que permite reducir el contenido de humedad hasta un 50-60 % en base húmeda e incrementar el contenido de sólidos solubles (Spiazzi & Mascheroni, 2001). Se prefiere sobre otros métodos debido a que en los productos finales se preserva su color, aroma y nutrientes, usualmente se utiliza como proceso de secado anterior a otro proceso de conservación para disminuir costos de producción.

El secado convectivo es uno de los procesos de deshidratación más utilizados para conservar frutas y en la actualidad se utiliza combinado con pretratamientos como la deshidratación osmótica con el fin de aumentar la calidad del producto deshidratado y reducir el tiempo de secado (Muñiz Becerá et al., 2013).

El objetivo del uso de métodos combinados de secado se centra en tres aspectos fundamentales (Della Rocca, 2010):

- Mejorar la calidad caracterizada por una o más propiedades.
Minimizar la degradación química, cambios de estructura y textura poco significativos, variación de sabor y aroma, obtención del color deseado, control preciso del contenido de humedad.
- Protege el medio ambiente.
Minimizar el uso de energía en el proceso, reducir las pérdidas de producto en las corrientes de efluentes.
- Consideraciones económicas.
Reducir costos, desarrollar equipos simples, confiables y que requieran poca mano de obra, minimizar la proporción de productos fuera de especificación, desarrollar procesos estables capaces de operar en forma continua.

Al utilizar varios métodos de conservación en un mismo producto, se combinan los factores propios de cada uno y de esta manera el tiempo de vida útil de un alimento se prolonga.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un proceso para deshidratar plátano tabasco (*Musa paradisiaca* L.), mediante una metodología de tres etapas que permita obtener un producto de calidad, que conserve las propiedades sensoriales del plátano y sea agradable al consumidor para ofrecer una alternativa de consumo de esta fruta.

1.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar, mediante técnicas estadísticas y métodos sensoriales, el efecto de la combinación del pretratamiento para disminuir el oscurecimiento enzimático, la deshidratación osmótica y el secado convectivo con aire caliente sobre el tiempo de secado para determinar el conjunto de condiciones que resultan en un producto de mejor calidad y confirmar los resultados estadísticos de acuerdo con la preferencia del consumidor.
 - El análisis estadístico para determinar el conjunto de condiciones que resultan en un producto de mejor calidad.
 - El análisis sensorial del producto para confirmar los resultados estadísticos de acuerdo con la preferencia del consumidor.
- Proponer un proceso que permita obtener las mejores condiciones con base en los análisis obtenidos, para conservar la fruta.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

1 CUADRO METODOLÓGICO

Metodología de deshidratación

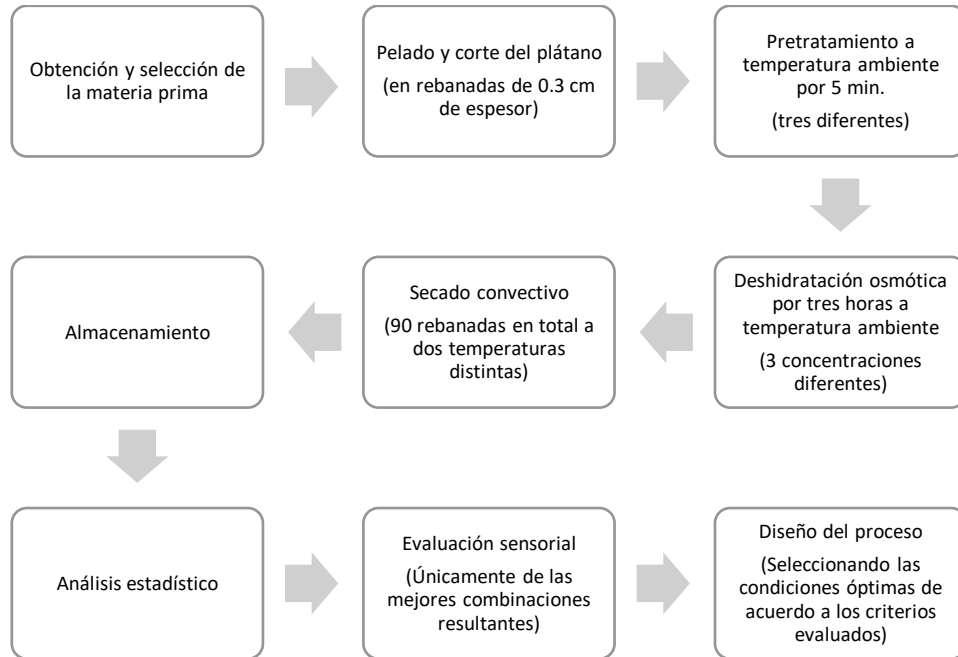


Figura 5. Metodología de deshidratación.

Caracterización del plátano

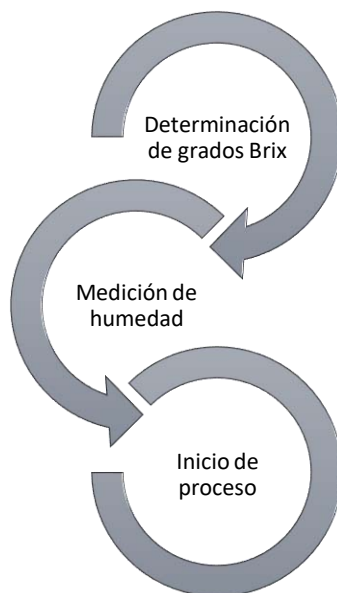


Figura 6. Caracterización del plátano.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Proceso de deshidratación

- Recepción y selección de la materia prima

Se utilizaron plátanos tabasco (*Musa paradisiaca* L.), obtenidos en la tienda de autoservicio Tienda UNAM, ubicada en Ciudad Universitaria.

Los frutos seleccionados tuvieron un grado de madurez tipo 3 (*Figura 1*), con una consistencia adecuada para su fácil manipulación, y un contenido de almidón ideal para la deshidratación osmótica y la convectiva. Además de tomar en cuenta el grado de madurez, los frutos se seleccionaron con base en su color, firmeza y sin evidencia de daños mecánicos.

Las muestras fueron trasladadas al laboratorio L-313 en el Conjunto E de la Facultad de Química, UNAM, donde se procesaron el mismo día de su compra.

- Pelado y cortado

Se peló el plátano de forma manual y el fruto fue cortado en rodajas de 0.3 cm de espesor con una rebanadora de mano. La apertura de la hoja fue medida con un Vernier. Se colocaron noventa rebanadas en una malla metálica para facilitar su manejo.

- Pretratamiento

Las rodajas se sumergieron durante 5 min en diferentes disoluciones de 1 g / 100 g de ácido cítrico, ácido ascórbico y trehalosa para inhibir la alteración en el color.

Después de cada tratamiento, la fruta se escurrió y se retiró el exceso de disolución presionando suavemente con una toalla de papel.

- Deshidratación osmótica

La disolución osmótica se preparó con azúcar refinada en concentraciones distintas: 25, 35 y 45 °Bx. Las rebanadas de plátano pretratadas fueron sumergidas durante 3 h en la disolución hipertónica a temperatura ambiente. Se tomó una muestra de plátano cada 20 min y se midieron grados Brix para determinar la cantidad de sólidos solubles en el producto. Al finalizar el proceso, se secó y escurrió el exceso de jarabe.

- Secado convectivo

Esta operación se hizo en un secador de bandejas atmosférico (APEX, modelo SSE70, México) a 70 y 90 °C, a una velocidad de entrada de aire de 2.5 m/s. Se dividió una bandeja de 81.3 cm x 40.3 cm x 3.5 cm en seis sectores y en ellos se colocaron quince rebanadas de plátano. Cada sector se pesó de manera individual. Se tomó una rebanada de cada sector, se pesó y se colocó en una charola más pequeña de dimensiones (15.2 x 14.8 x 3.0) cm, con la cual se monitoreó la masa durante el secado convectivo. Durante toda la operación se midió la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura de bulbo seco y la humedad en la entrada y la salida del secador con un termómetro de mercurio con el bulbo cubierto de algodón húmedo y un termohigroanemómetro (EXTECH, modelo 45160, EE. UU.), con una precisión de ± 3 % F.S. (Full Scale) en la medición de velocidad de aire, ± 1.2 °C en temperatura y ± 4 % RH dentro del intervalo de humedad de 10 a 70 %.

En la *Tabla 2* se muestra el esquema bajo el cual se realizaron las combinaciones de tratamientos durante la experimentación, se realizaron tres repeticiones de cada una para garantizar repetibilidad y reproducibilidad en los resultados.

Tabla 2. Condiciones de secado combinado con pretratamiento para rebanadas de plátano.

Temperatura (°C)	Pretratamiento (1 % m/m)	Ósmosis (°Bx)
70	Ácido Cítrico	25
		35
		45
	Ácido Ascórbico	25
		35
		45
	Trehalosa	25
		35
		45
90	Ácido Cítrico	25
		35
		45
	Ácido Ascórbico	25
		35
		45
	Trehalosa	25
		35
		45

Caracterización del plátano

- Sólidos solubles (Grados Brix)

Se pesó un gramo de muestra y se molió con agua desionizada en proporción 1:3. De esta mezcla se tomó 1 mL aproximadamente y se midió la concentración de azúcares solubles con ayuda de un refractómetro manual (marca ATAGO modelo Master, Japón). El instrumento se limpió con agua desionizada después de cada medición para evitar errores de lectura.

- Humedad

Se colocó 1 g de muestra en una termobalanza (marca OHAUS modelo MB45-2A0, EE.UU.), para determinar el contenido de humedad en la muestra inicial.

Análisis estadístico

Para obtener los resultados para el tiempo de secado y el porcentaje de pérdida de agua se consideraron como variables independientes la temperatura durante el secado convectivo, la concentración de la disolución osmótica y el tipo de pretratamiento, y fueron analizados con ayuda del paquete estadístico *IBM SPSS Statistics 22*. (IBM Corp. Released 2013. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0. Armonk, NY: IBM Corp.)

Se realizó un análisis de varianza de tipo factorial considerando como variables independientes la temperatura, el pretratamiento y la concentración de la disolución osmótica, y como variables dependientes el tiempo total de secado y el porcentaje final de pérdida de agua.

Se elaboró una tabla en donde se recopilan los resultados obtenidos del análisis de varianza y se compararon los valores F de tablas (F_{TABLAS}) con los valores de F calculada ($F_{\text{CALCULADA}}$) obtenidos a partir de los grados de libertad, la suma de cuadrados y el error asociado para cada fuente de variación. Al comparar los valores de F calculada con los valores de F de tablas se puede encontrar cualquiera de las siguientes opciones:

- Si $F_{\text{CALCULADA}} < F_{\text{TABLAS}}$ para $\alpha = 0.05 \%$ se concluye que no existen diferencias significativas y se indica como NS (No Significativas).
- Si $F_{\text{CALCULADA}} > F_{\text{TABLAS}}$ para $\alpha = 0.05 \%$ se concluye que existen diferencias significativas y se indica con un asterisco (*).

- Si $F_{\text{CALCULADA}} > F_{\text{TABLAS}}$ para $\alpha = 0.05$ y 0.01 % se concluye que existen diferencias altamente significativas y se indica con dos asteriscos (**).

Si como resultado del análisis de varianza se encuentran diferencias de tipo significativas o altamente significativas se utiliza la Prueba de Rango Múltiple de Duncan, para determinar las condiciones óptimas en cada caso.

Es importante señalar que cuando se obtienen en algún análisis de varianza diferencias tipo significativas o altamente significativas para cualquiera de las interacciones entre las variables en estudio, esto indica que estas variables no se comportan de manera independiente y por lo tanto se deben analizar de manera conjunta y para su interpretación es necesario realizar la Prueba de Rango Múltiple de Duncan.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

1 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Las Figuras 7 y 8 muestran la contribución de cada operación de secado a la deshidratación total del plátano. El secado por ósmosis contribuyó con 10 a 15 % del total de remoción de agua. El resto se eliminó durante el secado convectivo.

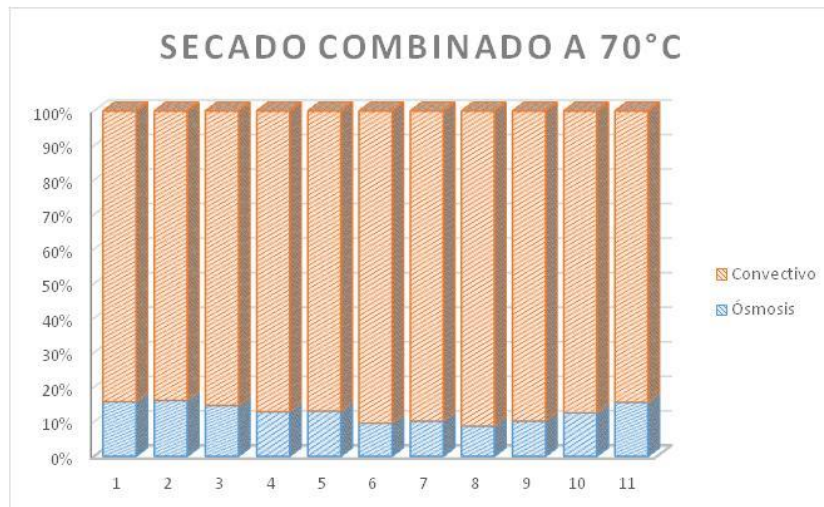


Figura 7. Contribución porcentual en el deshidratado de plátano Tabasco mediante secado osmótico y convectivo a 70 °C.

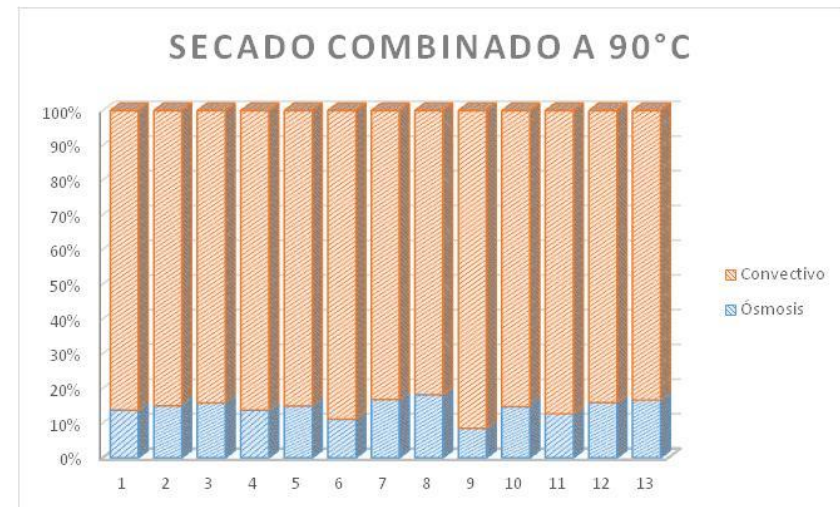


Figura 8. Contribución porcentual en el deshidratado de plátano Tabasco mediante secado osmótico y convectivo a 90 °C.

En la *Figura 9* y *10* se observa el comportamiento de la operación de secado osmótico a 25 °Bx a 70 °C y 90 °C respectivamente, la cual se llevó a cabo con un pretratamiento de trehalosa con una tasa de eliminación de agua para 70 °C de 34.92 g/min y 90 de 41.82 g/min y luego llega a un límite.

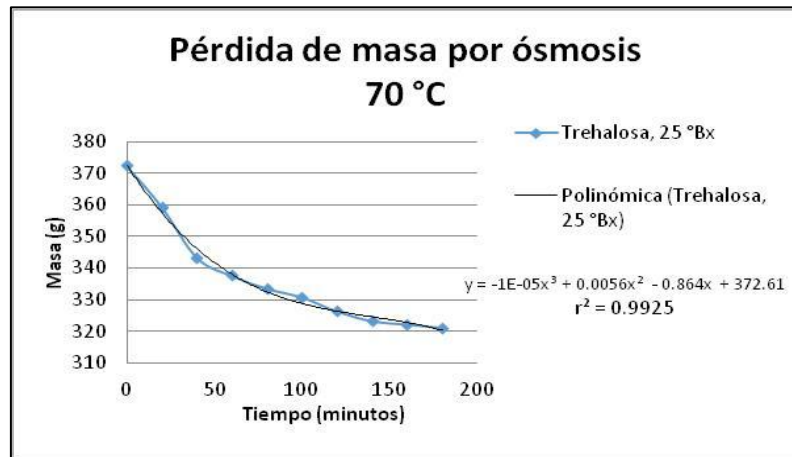


Figura 9. Pérdida de masa mediante secado osmótico a 25 °Bx y 70 °C, con un pretratamiento con Trehalosa.

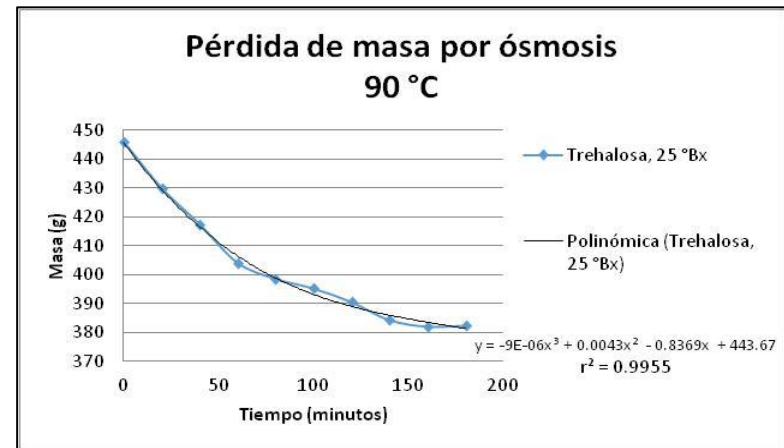


Figura 10. Pérdida de masa mediante secado osmótico a 25 °Bx y 90 °C, con un pretratamiento con Trehalosa.

Por otro lado, en las *Figuras 11* y *12*, el comportamiento que presenta el secado convectivo, se diferencia únicamente por el valor de r^2 , el cual es mayor en las operaciones a 90 °C, lo que indica que el polinomio propuesto se ajusta mejor a los tratamientos a altas temperaturas.

Las gráficas correspondientes al pretratamiento con trehalosa, DO a 45 °Bx con diferentes temperaturas de secado convectivo presentan un comportamiento similar, pero con un coeficiente de correlación, r^2 , menor, por lo que se incluyeron en el ANEXO 1.

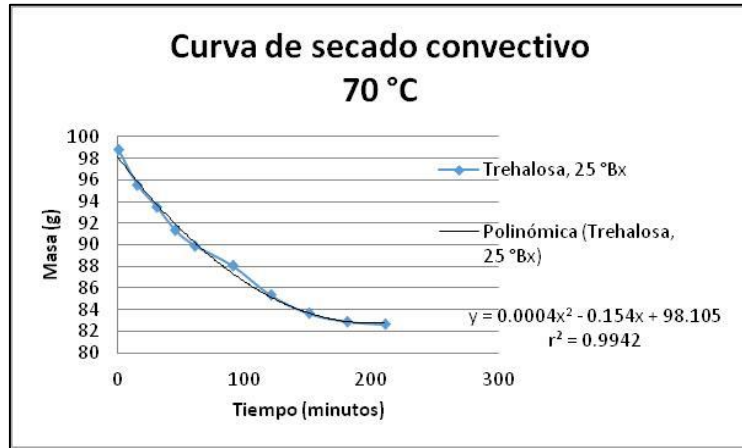


Figura 11. Pérdida de masa mediante secado convectivo a 90 °C.

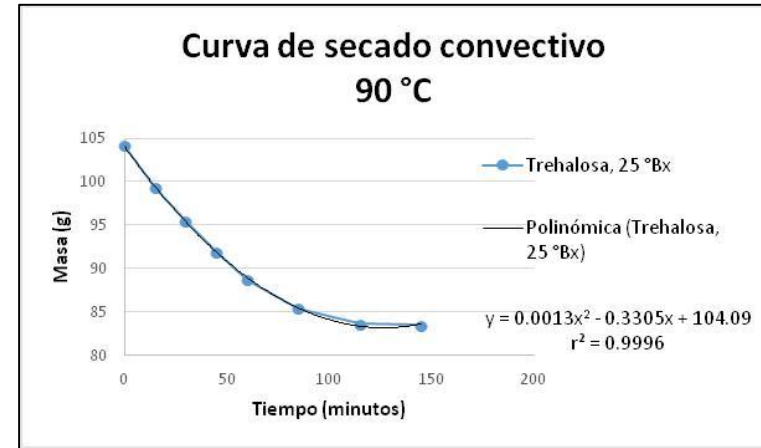


Figura 12. Pérdida de masa mediante secado convectivo a 70 °C.

En estas figuras se muestra el comportamiento de secado convectivo a 25 °Bx a 70 °C y 90 °C respectivamente, con una tasa de eliminación de 7.46 g/min para 70 °C y de 12.21 g/min para 90 °C; al avanzar el secado la tasa de eliminación de agua alcanza un límite

En las Figuras 9 y 10 se muestra cómo el secado ocurrió mediante el intercambio de sólidos y agua entre la fruta y la disolución osmótica. Por otro lado, en las Figuras 11 y 12 la pérdida de agua tuvo lugar por arrastre debido a la convección forzada con aire caliente.

En el secado osmótico, el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos experimentales es un polinomio de tercer orden, ya que para todos los casos presenta un coeficiente de correlación mayor que 0.95. Las altas concentraciones de trehalosa produjeron los mejores resultados según se observa por sus coeficientes de correlación.

El coeficiente de correlación del secado osmótico y convectivo a 90 °C fue mayor que a 70 °C. Entonces, los tratamientos llevados a cabo a altas temperaturas y con grandes concentraciones de disolución osmótica produjeron los mejores resultados.

Por otro lado, las condiciones más adecuadas de proceso se obtuvieron por análisis estadístico de los datos experimentales con el programa *IBM SPSS Statistics 22*, para ello se realizó un análisis de varianza de tipo factorial.

Como resultado del análisis de varianza para el tiempo total de secado, se observa que existen diferencias altamente significativas ($\alpha > 0.05$ y 0.01) para las variables temperatura, concentración y la interacción temperatura x concentración (Tabla E, ANEXO 2).

La interacción altamente significativa entre las variables temperatura y concentración, indica que ambas variables no se comportan de manera independiente. Para su interpretación se utilizó la Prueba de Rango Múltiple Duncan, considerando el efecto conjunto de ambas variables. Como resultado de la Prueba Duncan (Tabla F, ANEXO 2) se puede concluir que el menor tiempo de secado se obtuvo a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ con cualquiera de las tres concentraciones de la disolución osmótica (25 , 35 y $45\text{ }^{\circ}\text{Bx}$).

Por otro lado, el análisis de varianza del porcentaje de pérdida final de agua, mostró que existen diferencias altamente significativas ($\alpha > 0.05$ y 0.01%) para las variables temperatura, pretratamiento y concentración, así como en las interacciones temperatura x concentración y temperatura x pretratamiento x concentración (Tabla G, ANEXO 2).

La existencia de una interacción altamente significativa entre las variables temperatura x pretratamiento x concentración, indica que ninguna de ellas se comporta de manera independiente, por lo que se analizó su efecto conjunto (Tabla H, ANEXO 2). Se puede concluir que los mayores porcentajes de remoción total de agua se obtienen a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{Bx}$ con cualquier pretratamiento.

Partiendo de ambos resultados, estadísticamente podemos concluir que se obtienen mejores resultados a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25\text{ }^{\circ}\text{Bx}$; sin importar el tipo de

pretratamiento que se utilice, por lo que éste se definió a partir de costos e impacto sensorial sobre la muestra. Considerando lo anterior, el tratamiento se define por los resultados obtenidos al final del secado convectivo, ya que, a simple vista, los plátanos tratados con ácido ascórbico mostraron un ligero pardeamiento rosado en el centro de la rebanada, haciéndolo poco agradable a la vista. Por otro lado, con el ácido cítrico, permaneció un sabor ácido y con trehalosa no hubo alteraciones visibles y de sabor.

La evaluación sensorial, se hizo tomando en cuenta los resultados del análisis estadístico. Las muestras evaluadas correspondieron al pretratamiento con trehalosa, secado convectivo a 90 °C y concentraciones de 25 y 45 °Bx para la deshidratación osmótica. Se aplicaron 105 cuestionarios a empleados y alumnos de la Facultad de Química, UNAM. El cuestionario aplicado consistió en evaluar cinco atributos de la muestra (ANEXO 3).

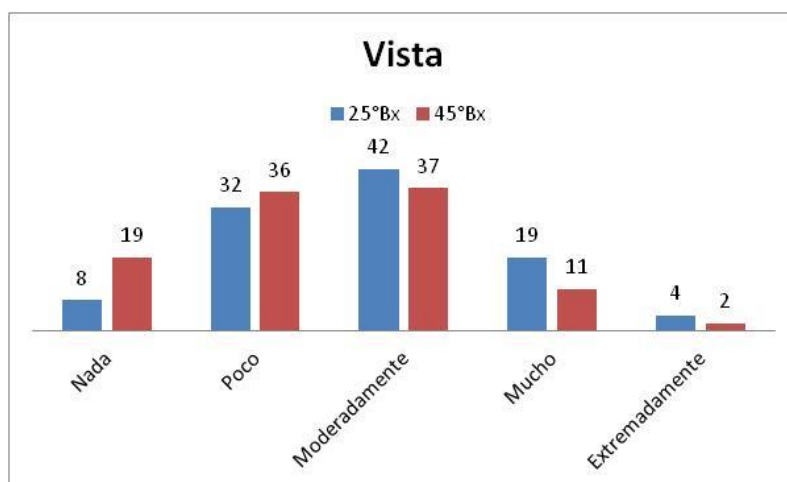


Figura 13. Resultados de la pregunta: ¿qué tanto le agrada el producto visualmente?

La *Figura 13* muestra que la mayoría de los resultados está entre las opciones "poco" y "moderadamente", con esta última en un mayor porcentaje. Por lo tanto, la mayoría de los evaluadores, prefirieron

“moderadamente” de manera visual la muestra producida por DO a 25 °Bx.

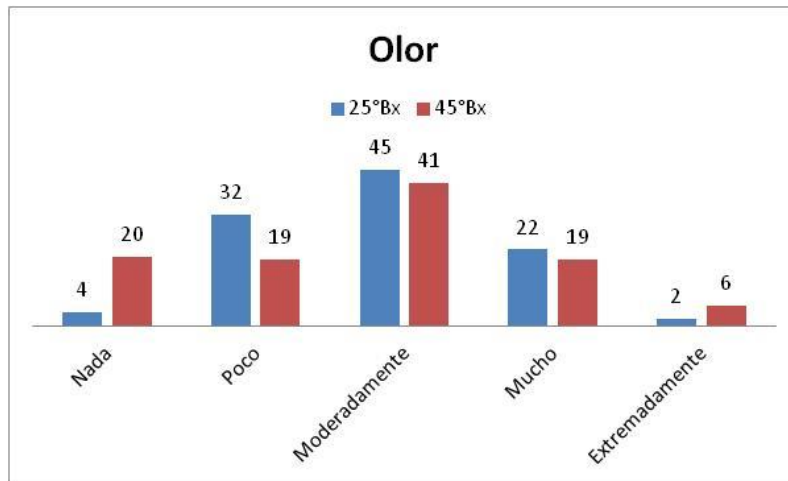


Figura 14. Resultados de la pregunta: ¿considera que el producto tiene un olor agradable?

El olor fue evaluado como “moderadamente” para la muestra de 25 °Bx, Figura 14.

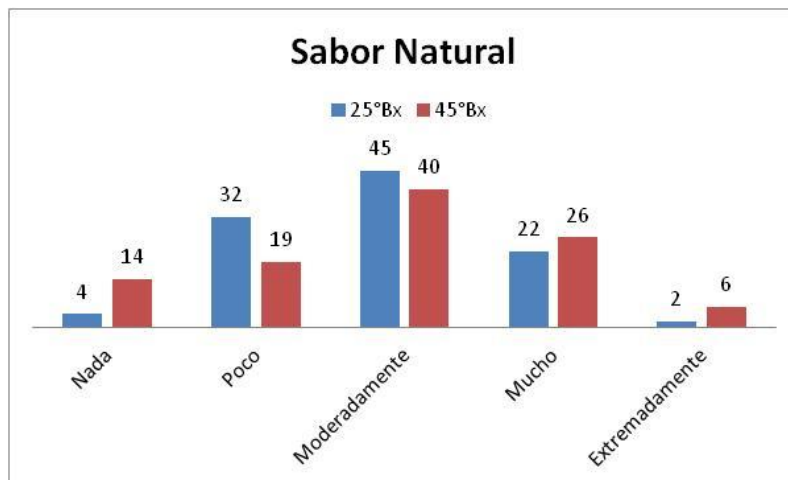


Figura 15. Resultados de la pregunta: ¿qué tanto considera que se conserva el sabor natural del producto?

Otro atributo evaluado fue el sabor natural, es decir, qué tanto de él se conservó. La mayoría de los encuestados, consideró que este atributo se conservó “moderadamente”, y percibió un mayor sabor natural en la muestra a 25 °Bx, Figura 15.

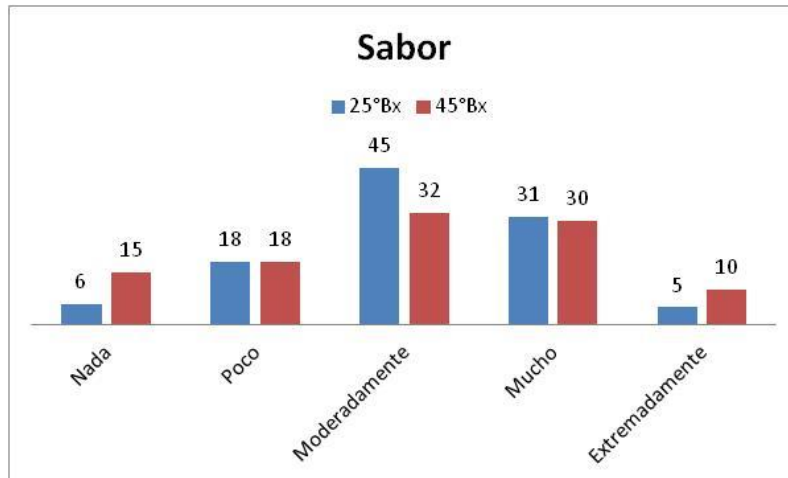


Figura 16. Resultados de la pregunta: ¿qué tanto le gusta el sabor del producto?

El sabor general del producto también fue evaluado como “moderadamente”, con una mayor preferencia para la muestra con 25 °Bx, *Figura 16*.

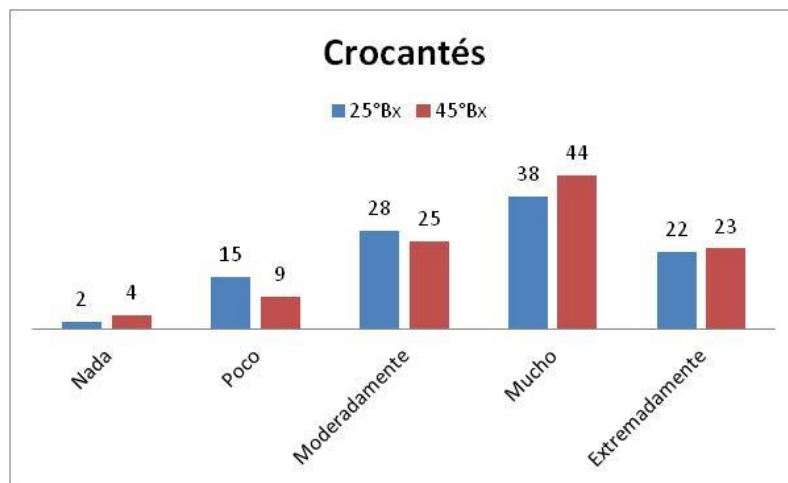


Figura 17. Resultados de la pregunta: ¿qué tan crocante le parece el producto?

La nota crocante del producto final también fue evaluada porque el producto es una fruta deshidratada y es deseable que sea crocante. Los evaluadores percibieron el producto con DO a 45 °Bx como muy crocante, *Figura 17*.

1.1 DISEÑO DEL PROCESO

1.1.1 Esquema general del proceso

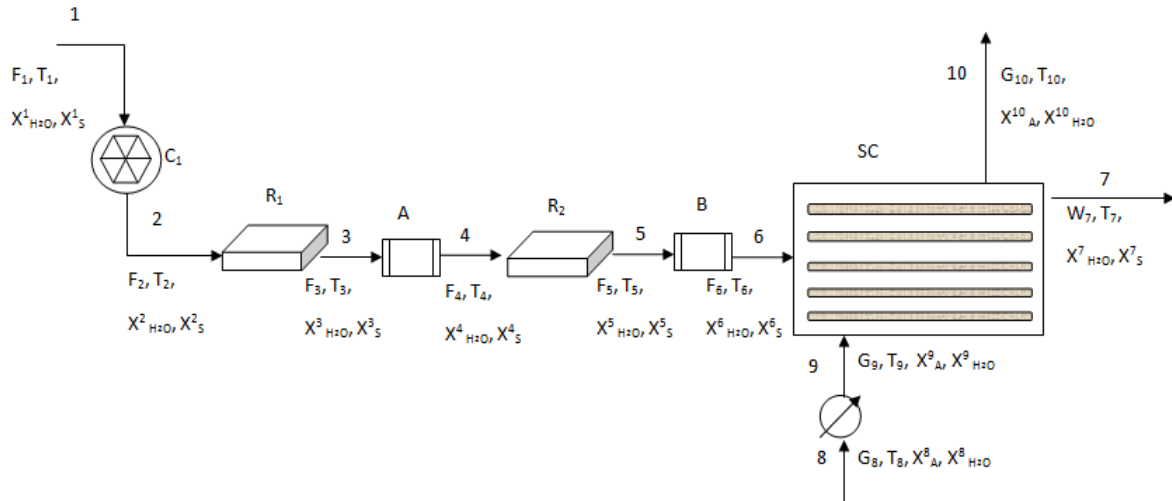


Figura 18. Esquema general del proceso.

C_1 : Cortadora manual; R_1 : Recipiente para el pretratamiento; A,B: Secador de papel; R_2 : Recipiente para secado osmótico; SC: Secador de charolas; F_x = Flujo (kg/h); G_x = Flujo de aire (kg/h); T_x = Temperatura ($^{\circ}$ C); $X_{H_2O}^x$ = Fracción de agua; X_S^x = Fracción de sólidos; X_A^x = Fracción de aire.

En la *Figura 18* se representa el proceso que se llevó a cabo. La corriente 1 representa el plátano sin cascara el cual pasa por la cortadora manual (C_1) para obtener rebanadas de 3 mm de espesor (corriente 2), posteriormente en un recipiente (R_1) se sumergen en una disolución con 1 g/ 100 g de diferentes inhibidores durante 5 min (corriente 3); terminado el tiempo se remueve el exceso de disolución (A) con toallas de papel durante 1 min aproximadamente (corriente 4); posteriormente se introducen al R_2 con una disolución hipertónica a 25, 35 o 45 $^{\circ}$ Bx durante tres horas (corriente 5) y se quita el exceso de disolución (B) con toallas de papel durante 1 min, en seguida, las rebanadas entran (corriente 6) a un secador convectivo (SC) a 70 o 90 $^{\circ}$ C hasta que

alcanzan una humedad y peso constantes. La corriente 7 simboliza el final del proceso para las rebanadas.

La corriente 8 muestra la entrada de aire al secador de charolas a humedad y temperatura ambiente, la cual pasa a través de resistencias eléctricas para aumentar su temperatura, representada por la corriente 9 que entra al proceso, el aire arrastra la humedad que es removida de las rebanadas durante el secado convectivo, la corriente 10 simboliza la salida del aire del secador con un porcentaje de humedad mayor.

1.1.2 Deshidratación por ósmosis

Durante esta operación el plátano perdió agua (WL), ganó sólidos solubles (SG) y se redujo su volumen (VR). Para el diseño se midió la masa de la fruta y la concentración de sólidos solubles, °Bx, de la disolución hipertónica. La pérdida de agua (WL) se calculó a partir de los datos de las mediciones realizadas y la pérdida de masa (WR) y la ganancia de sólidos (SG). Las tablas de datos correspondientes se incluyen en el ANEXO 4.

WR, SG y WL se calcularon con las ecuaciones (1-4):

$$WR = \frac{W_i - W_t}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

$$SG = \frac{SS_i - SS_t}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

$$WL = WR + SG \quad (3)$$

$$WL = \frac{M_i - M_t}{W_i} \times 100 \quad (4)$$

En ellas,

W_i es la masa inicial (g) de la muestra,

W_t es la masa instantánea (g) de la muestra,

SS_i la concentración inicial (°Bx) expresada como g sólidos/100 g MF,

SS_t es la concentración instantánea (°Bx) expresada como g sólidos/100 g MF,

M_i es la humedad inicial expresada en g H₂O/ 100 g MF, y

M_t es la humedad instantánea expresada en g H₂O/ 100 g MF.

Para estudiar la operación de deshidratación osmótica se utilizaron dos modelos matemáticos. El primero fue no exponencial de dos parámetros propuesto por Peleg en 1988. Este modelo describe las curvas que tienden a un valor asintótico o de equilibrio y está dado por

$$WL = \frac{100t}{W_i(k_1 + k_2t)} \quad (5)$$

La ecuación (5) puede ser expresada como $y = A + Bx$ según la ecuación (6)

$$\frac{1}{WL} = \frac{W_i k_2}{100} + \frac{W_i k_1}{100} \cdot \frac{1}{t} \quad (6)$$

El segundo modelo fue la ecuación formulada por Hawkes y Flink en 1978. Esta expresión se puede definir de diferentes maneras, de acuerdo con el parámetro que se desee cuantificar. En este caso se utilizó la pérdida de agua (WL), por lo que resulta la ecuación (7)

$$\frac{WL}{WL_\infty} = 2 \left(\frac{Dt}{\pi l^2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

En esta ecuación

D es el coeficiente de difusión (cm²/s)

t es el tiempo (s)

l es el espesor de la muestra (m^2)

WL_{∞} es la pérdida de agua en el equilibrio

WL es la pérdida de agua en el tiempo t .

La ecuación (7) puede ser expresada como

$$WL = A + Bt^{1/2} \quad (8)$$

Con B como pendiente dada por

$$B = 2WL_{\infty} \left(\frac{D}{\pi l^2} \right)^{1/2}$$

y A la ordenada al origen.

La *Tabla 3* muestra los factores de correlación, r^2 , resultantes de graficar ambos modelos (ANEXO 5). Estos datos revelan que el modelo de Peleg ajusta mejor los datos experimentales. Por ello, se calcularon los valores de k_1 y k_2 a partir de las gráficas que se incluyen en el ANEXO 5.

k_1 es una constante que se relaciona con la velocidad de transferencia de masa, por lo tanto a menor valor de k_1 mayor velocidad inicial de absorción de agua. El decrecimiento de k_1 con el incremento de la temperatura sugiere un correspondiente incremento en la velocidad inicial de absorción de agua cuanto mayor sea la temperatura.

k_2 es una constante relacionada con la máxima capacidad de absorción de agua, entre más bajo k_2 más alta la capacidad de absorción de agua. Sopade y Obekpa (1990) observaron que k_2 suele ser independiente de la temperatura del agua de remojo, representando una característica de absorción de cada producto. (Paredesa, et al., 2012)

Tabla 3. Coeficientes de correlación para dos modelos de DO a diferentes condiciones de operación, con pretratamiento en trehalosa.

Condiciones de operación		r^2		Coeficientes de Peleg	
° Bx	° C	Peleg	Hawkes	k_1	k_2
25	70	0.9613	0.9380	0.0157	1.5206
				0.0268	1.0806
				0.0119	1.3004
25	90	0.9910	0.9647	0.0086	1.3340
				0.0170	1.2495
				0.0053	1.5463
45	70	0.9434	0.9263	0.0088	2.4438
				0.0113	2.0242
				0.0079	1.5714
45	90	0.9696	0.9382	0.0283	1.0094
				0.0678	1.0018
				0.0100	1.6439

De la *Tabla 3*, se concluye que 90 °C es la mejor temperatura de proceso y que es mejor deshidratar osmóticamente a 25 °Bx. De acuerdo con esto, la ecuación propuesta para modelar el proceso es

$$\frac{1}{WL} = 5.3813 \frac{1}{t} + 0.0732 \quad (9)$$

En ella $k_1 = 0.0170$ y $k_2 = 1.250$.

1.1.3 Deshidratación convectiva

Cuando un sólido húmedo se expone a una corriente de aire, si la presión de vapor del agua en el sólido es mayor que la presión parcial de vapor de agua en el aire, el sólido pierde humedad hasta que estas presiones alcancen el equilibrio. La presión de vapor que ejerce la humedad contenida en un sólido depende de la forma de la humedad, del tipo de sólido y de la temperatura. Existen dos tipos de agua contenida en un sólido: agua libre y agua ligada. El primer tipo se localiza en los espacios entre las células de los materiales o en los capilares de precipitados porosos, mientras que el segundo representa el agua contenida al interior

de las células, mediante el secado convectivo únicamente se remueve el agua libre.

El método de secado depende del tipo de producto, sus propiedades físicas, su tolerancia a la temperatura y los requerimientos del proceso en cuanto a la forma de operación. Para el proyecto se utilizó un método adiabático, el cual consiste en adicionar aire caliente para secar el producto, sin que exista alguna otra fuente externa de energía.

Para diseñar el proceso por deshidratación convectiva se midieron las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco, y la humedad relativa del aire en la entrada y en la salida del equipo durante toda la operación. El resto de las propiedades del aire se obtuvo mediante el programa VAISALA/Humidity Calculator 5.0 (Copyright © Vaisala - www.vaisala.com). De esta manera, se caracterizó esta operación.

- Balance de materia

Datos del sistema

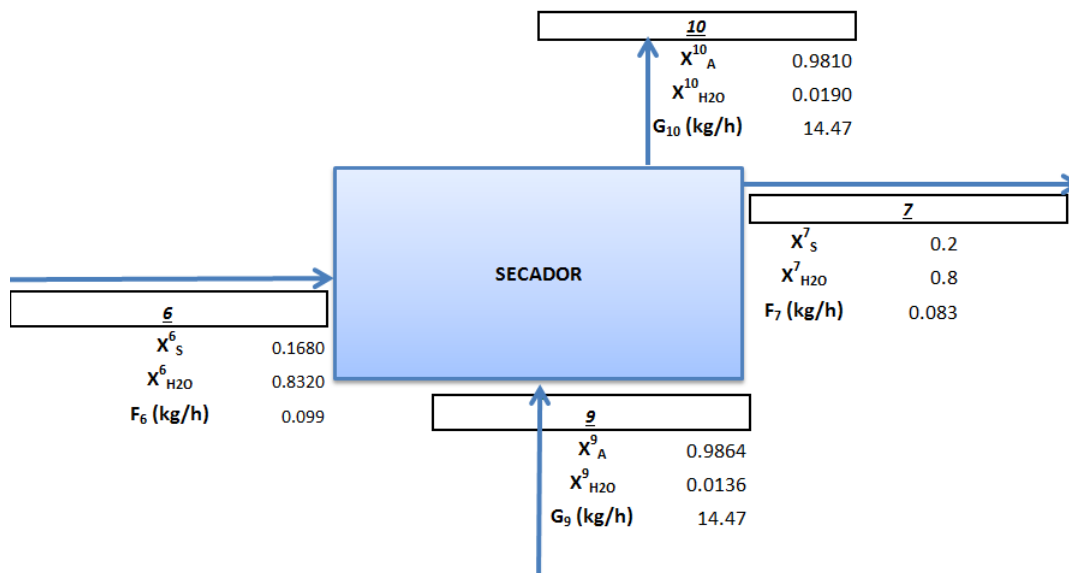


Figura 19. Esquema del balance de materia a 90 °C.

Balance General:

$$F_6 + G_9 = F_7 + G_{10} \quad (10)$$

De nuestro sistema se desconoce la corriente 10 (G_{10}), la cual se calcula con sus propiedades con la siguiente ecuación (11).

$$G_{10} = V \times A \times \rho \quad (11)$$

- Área de entrada del flujo de aire

$$A = \pi \times r^2 \quad (12)$$

$$r = 0.025 \text{ m}$$

- Densidad del aire

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{P \times M}{R \times T} \quad (13)$$

$$M = 0.029 \text{ kg/mol}$$

$$T = 332.41 \text{ K}$$

$$P = 0.77 \text{ atm}$$

$$R = 0.000082 \frac{\text{m}^3 \text{ atm}}{\text{mol K}}$$

$$v = 9000 \text{ m/h}$$

De la ecuación (10), despejamos la corriente 9 (G_9)

$$G_9 = F_7 + G_{10} - F_6 \quad (14)$$

Balance de materia para sólidos

$$F_6 \times X_S^6 = F_7 \times X_S^7 \quad (15)$$

Para conocer la fracción de sólidos en la corriente 6 (X_S^6), despejamos:

$$X_S^6 = \frac{F_7 \times X_S^7}{F_6} \quad (16)$$

$$X_{H_2O}^6 = 1 - X_S^6 \quad (17)$$

Balance para agua

$$F_6 \times X_{H_2O}^6 + G_9 \times X_{H_2O}^9 = F_7 \times X_{H_2O}^7 \quad (18)$$

- Balance de energía

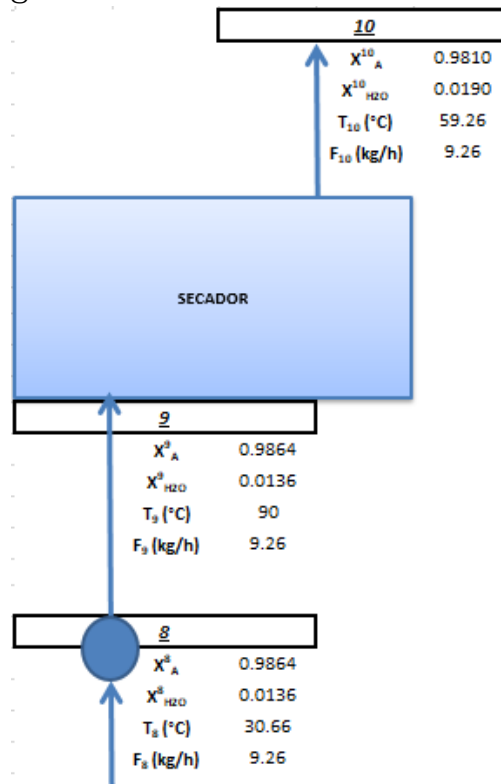


Figura 20: Esquema del balance de energía a 90 °C.

El calor requerido por el proceso se calculó estableciendo el balance general de energía para el sistema, el cual se planea a partir de la Figura 20.

Balance general de energía

$$G_9 H_9 = G_{10} H_{10} + Q \quad (19)$$

Despejando el calor (Q) de la ecuación (19) se obtiene:

$$Q = G_9 H_9 - G_{10} H_{10} \quad (20)$$

Dado que el flujo es constante en el sistema, $G_9 = G_{10}$, por lo tanto:

$$Q = G(H_9 - H_{10}) = G\Delta H \quad (21)$$

Ya que en el sistema ocurren cambios de temperatura, las ecuaciones para calcular el calor de la corriente 8 a 9 y de la corriente 9 a 10 se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{9-8} = G\Delta H_{9-8} = G(Cp_A(X_A^8 + X_A^9) + Cp_{H_2O}(X_{H_2O}^8 + X_{H_2O}^9)) \quad (22)$$

$$Q_{10-9} = G\Delta H_{10-9} = G(Cp_A(X_A^9 + X_A^{10}) + Cp_{H_2O}(X_{H_2O}^9 + X_{H_2O}^{10})) \quad (23)$$

Caracterización de la cantidad de flujo en el sistema

- Se determina el área de la entrada del flujo del aire:
 $r = 0.025 \text{ m}$

$$A = \pi r^2 = [m^2] \quad (24)$$

- Determinar la densidad del flujo de la corriente:

$$M = 0.029 \text{ kg/mol}$$

$$T = 332.41 \text{ K}$$

$$P = 0.77 \text{ atm}$$

$$R = 0.000082 \frac{m^3 \text{ atm}}{\text{mol K}}$$

$$v = 9000 \text{ m/h}$$

$$\rho = \frac{P * M}{R * T} = \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (25)$$

$$F = v * A * \rho = \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (26)$$

Determinación del calor

Haciendo uso de las ecuaciones (22) y (23), se calculó el calor del intercambiador entre la corriente 8 y 9 y el calor del secador entre la corriente 9 y 10 respectivamente a 70 y 90 °C.

Tabla 4. Calor calculado a 70 y 90 °C.

90 °C		70 °C	
Q ₈₋₉	Q ₉₋₁₀	Q ₈₋₉	Q ₉₋₁₀
kJ / h		kJ / h	
1812.48	-946.53	1275.69	-336.24

En la *Tabla 4* podemos observar que el calor entre la corriente 9 y 10 es negativo. Esto indica que se está perdiendo calor durante el proceso, lo

cual es esperado debido a que el equipo no está aislado y por ello se transfiere calor hacia sus alrededores.

Este valor también nos indica que el secado no fue completamente adiabático y existen otras fuentes de transmisión de calor al producto, ya que a pesar de la pérdida de calor, la muestra sí se deshidrató. Una de estas fuentes es la transferencia de calor por conducción, ya que también se calienta la charola sobre la cual se colocaron las rebanadas de plátano y provoca una transferencia en menor medida.

De acuerdo con los resultados experimentales, el proceso a 90 °C pierde más calor con sus alrededores, sin embargo, a esta temperatura se obtienen mejores resultados en la muestra final.

El comportamiento del secado convectivo se representa gráficamente en los diagramas psicrométricos mostrados en las Figuras 21 y 22.

La línea roja representa los datos experimentales, es decir, el recorrido de la corriente 8 a la 10, la línea azul punteada muestra el recorrido si el secador estuviese encaquetado, es decir, que no hubiera transferencia de calor hacia los alrededores la cual se muestra como la corriente 10'.

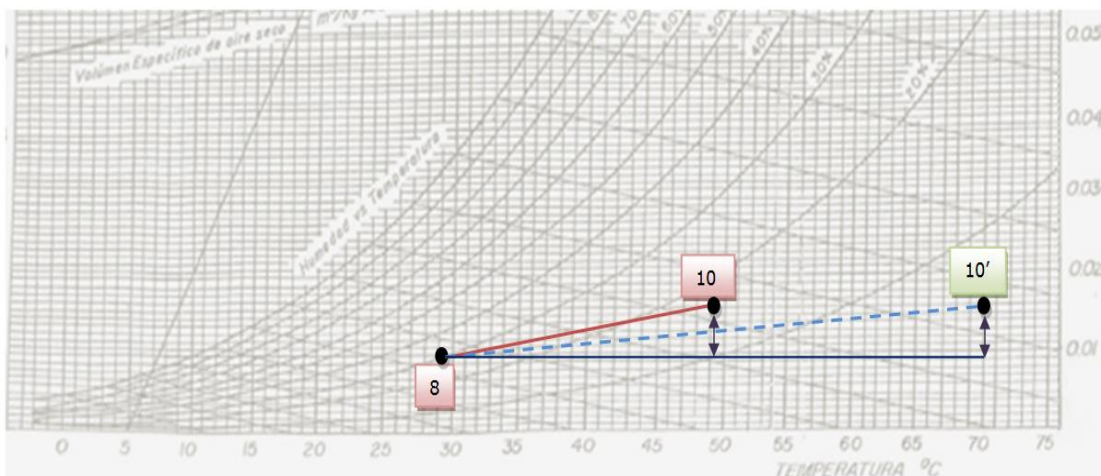


Figura 21. Gráfica de la operación de deshidratación convectiva a 70 °C, pretratamiento con trehalosa y deshidratación osmótica a 25 °Bx.

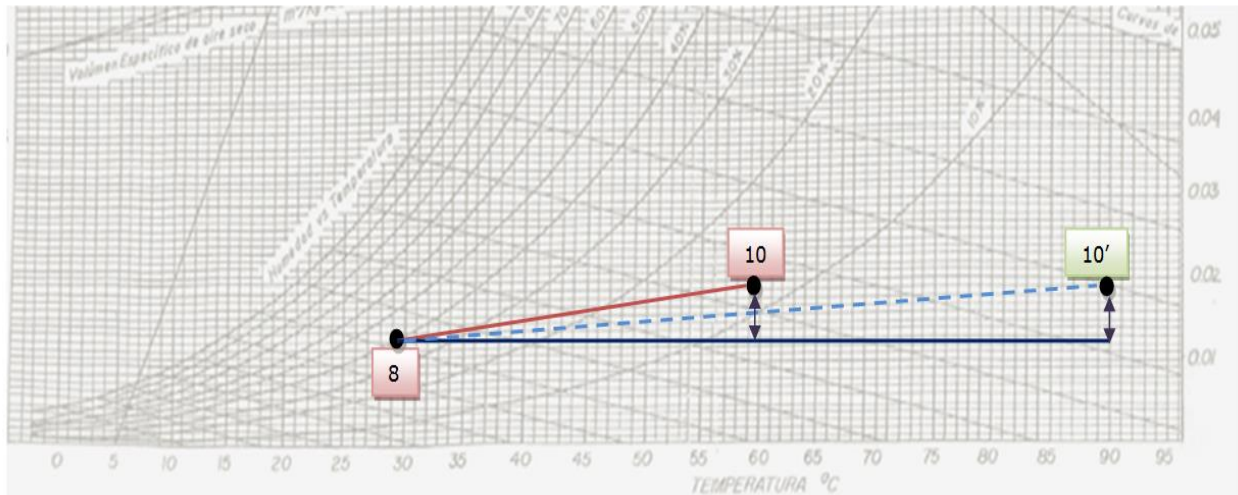


Figura 22. Gráfica de la operación de deshidratación convectiva a 90 °C, pretratamiento con trehalosa y deshidratación osmótica a 25 °Bx.

Se construyeron las curvas de secado para los datos experimentales de tiempo y pérdida de masa del alimento y se transformaron en datos de tiempo y humedad base seca mediante la ecuación

$$h_{bs} = \frac{m(t) - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (27)$$

$m(t)$ es la masa del alimento húmedo para cada tiempo en kg.

m_{ss} es la masa del sólido seco en kg ss.

$h_{bs}(t)$ es la humedad base seca al tiempo t .

A continuación, se calculó la humedad libre, h_L , con la ecuación (28), considerando la humedad de equilibrio, h_e , como cero, ya que graficando los valores, se observa esa tendencia.

$$h_L(t) = h_{bs}(t) - h_e \quad (28)$$

Graficando la ecuación (28) con respecto al tiempo se obtiene la primera curva de secado.

Para analizar el secado, es necesario graficar el flux de secado contra la humedad libre.

$$R = -\frac{m_{ss}}{A} \frac{dh_L}{dt} \quad (29)$$

A es el área de secado en m².

R es el flux de secado en kg/h m².

Y dh_L/dt es la derivada de la ecuación obtenida de la primera curva de secado.

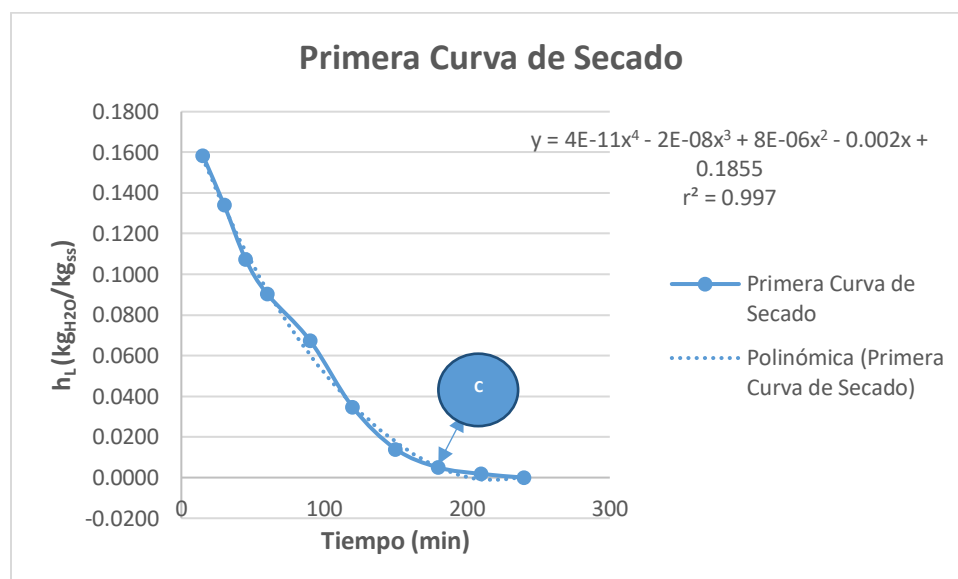


Figura 23. Primera Curva de Secado para DO a 25 °Bx, con pretratamiento con trehalosa y secado convectivo a 70 °C.

La *Figura 23* muestra la primera curva de secado a 70 °C, se grafica la disminución de la humedad libre vs. tiempo, llegando a un límite habitualmente conocido como "peso constante". El punto C es el límite entre el periodo de velocidad constante, donde ocurre la mayor parte del secado, y el de velocidad decreciente, y la humedad para la cual se aprecia este límite se denomina humedad crítica, h_c, y su valor es de 0.0050 kg_{H2O}/kg_{ss}.

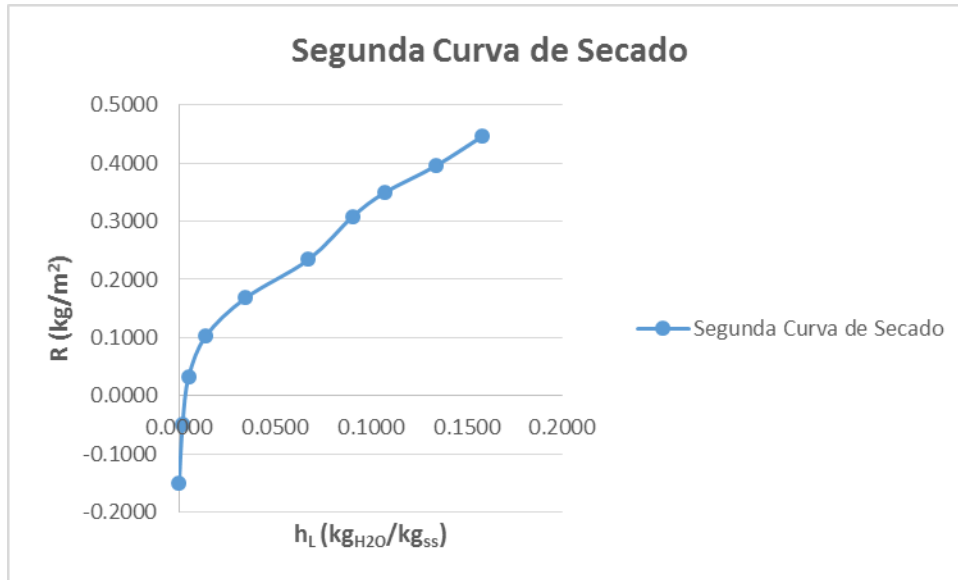


Figura 24. Segunda Curva de Secado para DO a 25 °Bx, con pretratamiento con trehalosa y secado convectivo a 70 °C.

La Figura 24 fue construida a partir del polinomio obtenido de la primera curva de secado, y representa el flux de secado, es decir, la velocidad de secado referido al área de secado. A 70 °C no se observa un periodo de velocidad constante, R_c .

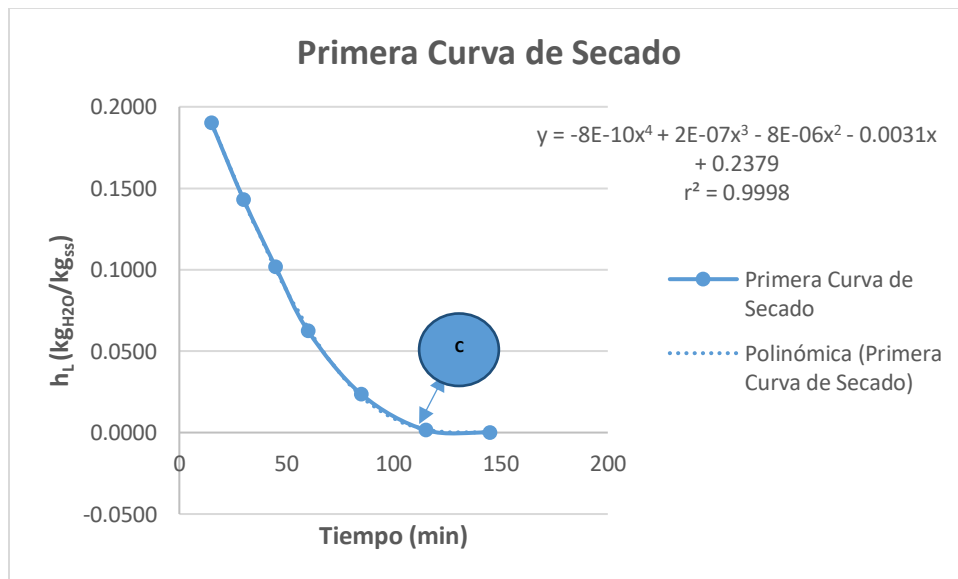


Figura 25. Primera Curva de Secado para DO a 25 °Bx, con pretratamiento con trehalosa y secado convectivo a 90 °C.

En la Figura 25 se observa la disminución de la humedad libre respecto al tiempo, es un comportamiento similar al de la Figura 23, sin embargo, el

coeficiente de correlación es mayor a 90 °C, lo que indica un mejor ajuste de la ecuación propuesta a los datos experimentales. En este caso, la humedad crítica es 0.0016 kg_{H2O}/kg_{ss}.

La *Figura 26* grafica el flux de secado respecto a la humedad libre, aquí se observa que la operación llega a un periodo de velocidad constante a partir del punto C, correspondiente a 0.7965 kg /h·m², y es un límite en qué tan rápido el proceso pierde humedad; la discontinuidad se presenta debido a un error experimental.

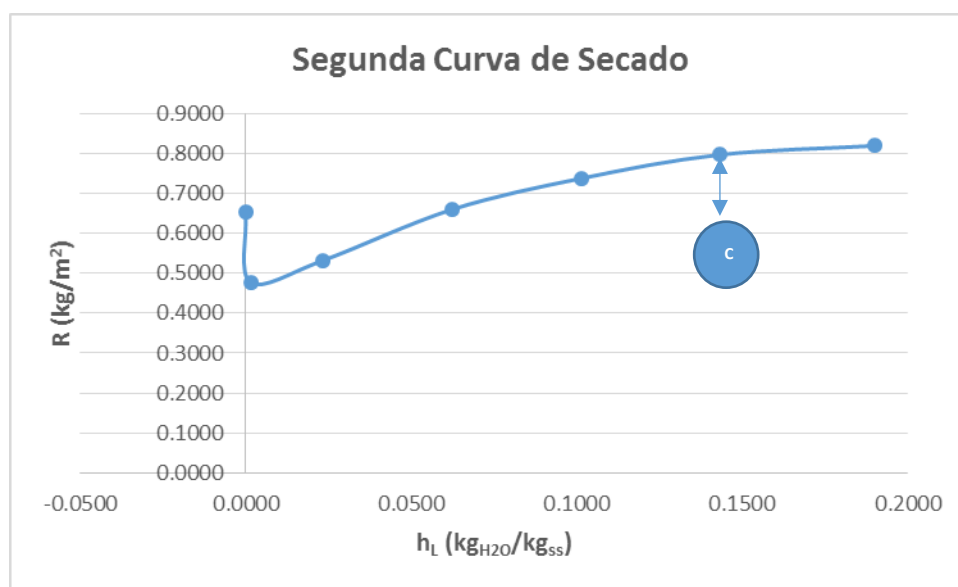


Figura 26. Segunda Curva de Secado para DO a 25 °Bx, con pretratamiento con trehalosa y secado convectivo a 90 °C.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- Se diseñó un proceso para deshidratar plátano tabasco (*Musa paradisiaca* L.) mediante una metodología de tres etapas que permitió obtener un producto que conservó en gran medida las propiedades sensoriales del plátano.
- El análisis estadístico mostró que las condiciones de operación adecuadas para obtener un menor tiempo de secado fueron 90 °C para el secado convectivo y 45 °Bx de concentración de la disolución osmótica. Si lo que se desea es eliminar la mayor cantidad de agua del fruto, el tipo de pretratamiento que se aplique sí tiene influencia. El mejor tratamiento fue con trehalosa, aunque la temperatura más alta se mantuvo como mejor condición, y una concentración de 25 °Bx.
- La deshidratación osmótica funcionó mejor a bajas concentraciones de disolución osmótica. Esto es contrario a lo esperado y puede deberse a la ausencia de agitación durante la operación para no afectar la integridad física de la fruta. Por ello, la disolución se saturó y la transferencia de masa fue limitada.
- La deshidratación convectiva a 90 °C produjo los mejores resultados. De manera teórica, la operación debe comportarse como un sistema adiabático, es decir, únicamente se espera secado mediante el arrastre de humedad por aire caliente dentro del secador convectivo. Sin embargo, en la práctica no se observó este comportamiento ya que el análisis energético de la operación indica la presencia de otras fuentes de transferencia de calor. Una de ellas es el secado por conducción, ya que la charola donde se colocó la fruta se calienta y transfiere parte de calor al producto. Por otro lado, la falta de aislamiento térmico del equipo, provocó el

intercambio de calor hacia sus alrededores. Esta condición tuvo impacto sobre las condiciones finales del proceso.

- El análisis sensorial reveló que la preferencia de los evaluadores se ubica en **la escala de "moderadamente"**, esto podría deberse a que el panel de evaluación sensorial no fue un grupo entrenado y por ende no pudo distinguir de manera imparcial las propiedades físicas evaluadas durante la investigación.

RECOMENDACIONES

- La deshidratación osmótica podría mejorarse al combinar diferentes factores limitantes del desarrollo microbiano o del deterioro enzimático con una disminución de la actividad de agua. Algunos de ellos serían el pH, la temperatura de almacenamiento, el uso de conservadores químicos o el envasado al vacío.
- Para disminuir la influencia de otro tipo de mecanismos de transferencia de calor durante el secado convectivo, se podría utilizar una malla de nylon en lugar de una charola metálica. Con ello se disminuiría el impacto de la transferencia de calor por conducción, además de aumentar la superficie de contacto del producto con el aire. Esto propiciaría un secado más uniforme y le daría al proceso un mayor carácter adiabático.

REFERENCIAS

- Amami, E. y otros, 2017. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, Issue 36, pp. 286-300.
- Aranda González, M. M., 2016. TESIS: Modelado de la deshidratación de las tiras de pulpa de aguacate variedad Hass (Persea americana Mill.) por medio de un secado convectivo, bajo la influencia de un pretratamiento osmótico. En: V. A. M. Corvera Pillado, ed. México: UNAM, p. 11.
- Cabrera Vázquez, A., 2004. *El efecto de la temperatura de operación sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando vapor sobrecalentado para diferentes tipo de partículas*, Cholula, Puebla, México.: s.n.
- Defraeye, T. & Radu, A., 2017. Convective drying of fruit: A deeper look at the air-material by conjugate modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Issue 108, pp. 1610-1622.
- Della Rocca, P., 2010. TESIS: Secado de alimentos por métodos combinados: Deshidratación osmótica y secado por microondas y aire caliente.. En: R. Dr. H. Mascheroni, ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional (Facultad Regional Buenos Aires), pp. 13-19, 40-42.
- García W., C. L., Giraldo G. , G. A., Hurtado T., H. & Mendivil, C. O., 2006. Cinética enzimática de la polifenoloxidasas del banano Gros Michel en diferentes estados de maduración. *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 13(2), pp. 13-19.
- Hernández Valdez, C. E., 2009. TESIS: Acción y efectos de la polifenoloxidasas en alimentos. En: M. M. en C. Castillo Morales, ed. Veracruz: Universidad Veracruzana: Facultad de Ciencias Químicas, p. 13.
- Hernández, L. M. & Vit, P., 2009. El plátano: Un cultivo tradicional con importancia nutricional. *Revista del Colegio de Farmacéuticos del Estado de Mérida*, 11(13), p. 13.
- Montti Tepper, P. A., 1996. TESIS: Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de palta cv fuerte. En: Santiago, Chile: s.n., pp. 15-22.
- Moreno Ordóñez, A. G., 2005. TESIS: Diseño de un proceso para la maduración acelerada de banano utilizando etefón como agente madurador. En: Ecuador: s.n., pp. 6-24.
- Muñiz Becerá, S., Hernández Gómez, A. & García Pereira, A., 2013. Empleo del método de secado convectivo combinado para la deshidratación de papaya (carica papaya L.) variedad maradol roja. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(Esp.), pp. 31-37.
- Ochoa-Reyes, E. y otros, 2012. Tecnologías de deshidratación para la preservación de tomate. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud.*, XV(2), p. 2.
- Ortiz Alfaro, B. S., 2003. *Tesis: Secado con bomba de calor para la deshidratación de frutos*. [En línea]
Available at: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/ortiz_a_bs/capitulo2.pdf
[Último acceso: 04 Mayo 2017].

Paredesa, E. y otros, 2012. Aplicación del modelo de Peleg para estudiar el efecto de la temperatura y dureza del agua durante la rehidratación de frijol caballero (*Phaseolus vulgaris*).. *Agroindustrial Science*, Volumen 1, pp. 5-6.

Quiceno, M. C., Giraldo, G. A. & Villamizar, R. H., 2014. Caracterización fisicoquímica del plátano (*Musa Paradisiaca* sp. AAB, Simmonds) para la industrialización.. *UGCiencia*, Issue 20, pp. 40-54.

Rodríguez, M. M., 2013. TESIS DE DOCTORADO: Obtención de frutos deshidratados de calidad diferenciada mediante la aplicación de técnicas combinadas. En: R. H. Dr. Mascheroni, ed. Olavarría, Argentina: s.n., pp. 7-13.

Secretaría de Economía, 2012. *Monografía del Sector Plátano en México: Situación Actual y Oportunidades de Mercado*, s.l.: s.n.

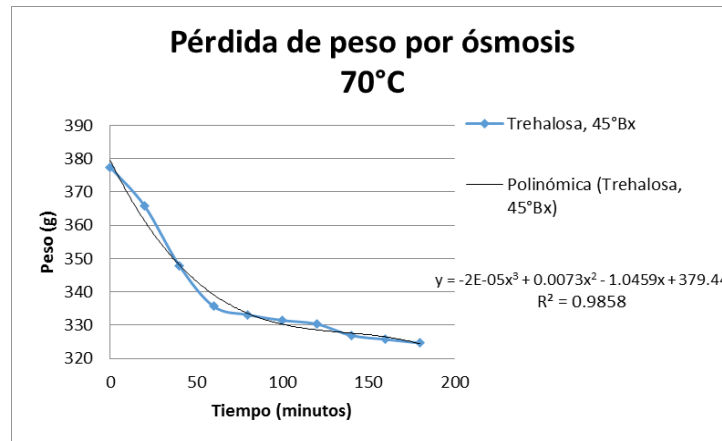
Spiazzi, E. A. & Mascheroni, R. H., 2001. Modelo de deshidratación osmótica de alimentos vegetales. *MAT*, Serie A(4), p. 23.

Valera, A., Zambrano, J., Materano, W. & Quintero, I., 2005. Efectos de la concentración de soluto y la relación fruta/jarabe sobre la deshidratación osmótica de mango en cilindros. *Agronomía Tropical*, 1(55), pp. 117-119.

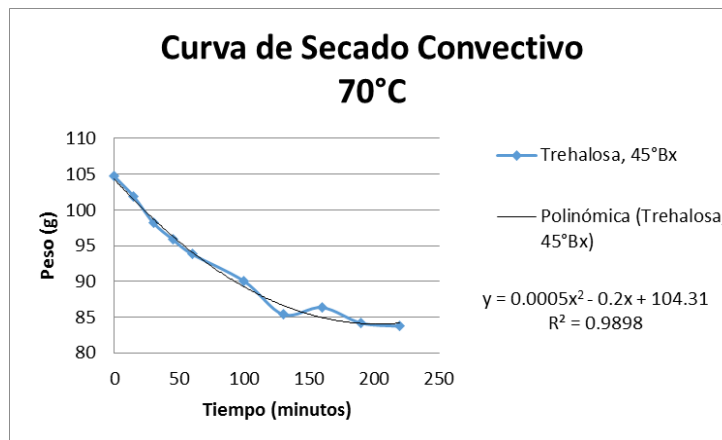
ANEXOS

ANEXO 1: GRÁFICAS REPRESENTANTES DEL COMPORTAMIENTO DE SECADO PARA 45 °Bx A DIFERENTES TEMPERATURAS.

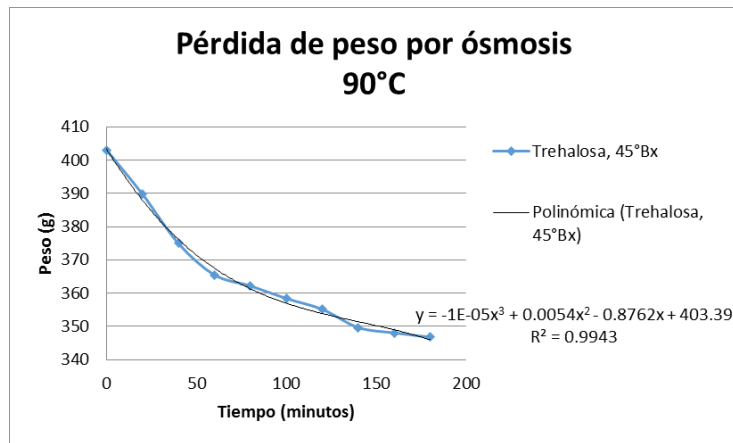
Gráfica A. Pérdida de masa mediante secado osmótico a 45 °Bx y 70 °C, con un pretratamiento con Trehalosa.



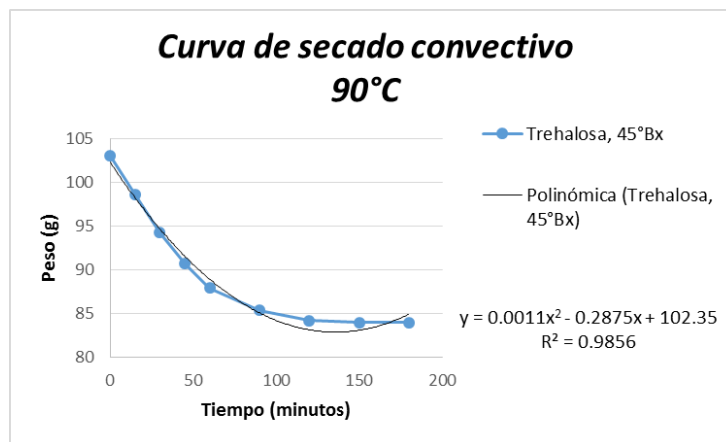
Gráfica B. Pérdida de masa mediante secado convectivo a 70 °C.



Gráfica C. Pérdida de masa mediante secado osmótico a 45 °Bx y 90 °C, con un pretratamiento con Trehalosa.



Gráfica D. Pérdida de masa mediante secado convectivo a 90 °C.



ANEXO 2: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla E. Análisis de varianza tipo factorial aleatorio para el tiempo de secado convectivo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	G.L.	Cuadrado medio	F _{CALCULADA}	F _{TABLAS} (α)		Interpretación
					0.05	0.01	
<i>Temperatura</i>	97962.963	1	97962.963	110.785	4.11	7.40	**
<i>Pretratamiento</i>	3336.111	2	1668.056	1.886	3.26	5.25	N.S.
<i>Concentración</i>	37158.333	2	18579.167	21.011	3.26	5.25	**
<i>Temperatura * Pretratamiento</i>	878.704	2	439.352	0.497	3.26	5.25	N.S.
<i>Temperatura * Concentración</i>	19334.259	2	9667.130	10.932	3.26	5.25	**
<i>Pretratamiento * Concentración</i>	7105.556	4	1776.389	2.009	2.63	3.89	N.S.
<i>Temperatura * Pretratamiento * Concentración</i>	2324.074	4	581.019	0.657	2.63	3.89	N.S.
<i>Error</i>	31833.333	36	884.259				
<i>Total</i>	199933.333	53					

** Diferencia altamente significativa.

N.S. No existe diferencia significativa.

Tabla F. Prueba de Rango Múltiple Duncan para el tiempo de secado convectivo.

Clasificación de las interacciones según Duncan					Interpretación*
Interacciones	Grupos				
	1	2	3	4	
90°C , 45°Bx	126.111				126.1 ± 29.6 a
90°C , 25°Bx	138.333	138.333			138.3 ± 39.7 ab
90°C , 35°Bx	144.444	144.444			144.4 ± 40.1 ab
70°C , 45°Bx		169.444			169.4 ± 17.6 b
70°C , 25°Bx			215.556		215.5 ± 19.9 c
70°C , 35°Bx				279.444	279.4 ± 30.0 d

El resultado de la prueba Duncan produjo cuatro grupos. Para su interpretación, se asignó una letra diferente a cada grupo. Para identificar la mejor o mejores combinaciones de temperatura-concentración se

consideraron las que presentan un menor tiempo de secado, para este caso se tomaron las primeras tres pertenecientes al grupo identificado con la letra "a".

Tabla G. Análisis de varianza tipo aleatorio para el porcentaje de pérdida de agua durante el secado convectivo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	G.L.	Cuadrado medio	F _{CALCULADA}	F _{TABLAS} (α)		Interpretación
					0.05	0.01	
Temperatura	106.996	1	106.996	21.736	3.87	6.72	**
Pretratamiento	48.484	2	24.242	4.925	3.03	4.68	**
Concentración	558.757	2	279.378	56.754	3.03	4.68	**
Temperatura * Pretratamiento	16.882	2	8.441	1.715	3.03	4.68	N.S.
Temperatura * Concentración	117.963	2	58.981	11.982	3.03	4.68	**
Pretratamiento * Concentración	32.473	4	8.118	1.649	2.40	3.38	N.S.
Temperatura * Pretratamiento * Concentración	162.224	4	40.556	8.239	2.40	3.38	**
Error	1506.320	306	4.923				
Total	2550.099	323					

** Diferencia altamente significativa.

N.S. No existe diferencia significativa.

El resultado de la prueba Duncan produjo seis grupos. Para su interpretación, se asignó una letra diferente a cada grupo. Para identificar la mejor combinación de estos factores se consideró la que presentara la mayor pérdida de agua, identificada con la letra "f".

Tabla H. Prueba de Rango Múltiple Duncan para el porcentaje de pérdida de agua durante el secado convectivo.

<i>Clasificación de las interacciones según Duncan</i>							Interpretación*
Interacciones	Grupos						
	1	2	3	4	5	6	
70°C, ascórbico, 45°Bx	68.791						68.79 ± 0.93 a
90°C, cítrico, 45°Bx		71.066					71.06 ± 1.72 b
70°C, cítrico, 45°Bx		71.459	71.459				71.45 ± 2.72 bc
70°C, trehalosa, 45°Bx		72.333	72.333	72.333			72.33 ± 1.74 bcd
90°C, trehalosa, 45°Bx		72.419	72.419	72.419			72.41 ± 1.84 bcd
90°C, ascórbico, 35°Bx		72.740	72.740	72.740			72.74 ± 4.05 bcd
70°C, cítrico, 35°Bx		72.749	72.749	72.749			72.74 ± 1.65 bcd
90°C, cítrico, 35°Bx		72.926	72.926	72.926			72.92 ± 1.22 bcd
90°C, trehalosa, 35°Bx		73.027	73.027	73.027			73.02 ± 1.33 bcd
70°C, cítrico, 25°Bx		73.050	73.050	73.050			73.05 ± 2.07 bcd
70°C, trehalosa, 35°Bx		73.124	73.124	73.124			73.12 ± 1.85 bcd
70°C, ascórbico, 25°Bx			73.559	73.559	73.559		73.55 ± 1.01 cde
90°C, ascórbico, 45°Bx				73.794	73.794		73.79 ± 4.42 de
70°C, ascórbico, 35°Bx				74.297	74.297		74.29 ± 2.60 de
70°C, trehalosa, 25°Bx				74.404	74.404		74.40 ± 1.97 de
90°C, ascórbico, 25°Bx					75.485	75.485	75.48 ± 1.10 ef
90°C, cítrico, 25°Bx					75.564	75.564	75.56 ± 1.73 ef
90°C, trehalosa, 25°Bx						77.087	77.08 ± 2.25 f

ANEXO 3: CUESTIONARIO DE EVALUACIÓN SENSORIAL

<i>Cuestionario de Evaluación Sensorial para muestras de plátano deshidratado.</i>	
<i>Género:</i>	(M / F)
<i>Edad:</i>	_____ años

La siguiente encuesta consta de dos partes. Para la primera parte tendrá que observar y oler las muestras que se le presentan. Para la segunda parte, usted tendrá que probar ambas muestras de izquierda a derecha, enjuagando su boca con agua antes de empezar y antes de probar la siguiente muestra.

Conteste las siguientes preguntas de acuerdo a su preferencia, marcando con una equis (x), para cada muestra, la respuesta que más se asemeje a su opinión.

1. De acuerdo a la siguiente escala, ¿qué tanto le agrada el producto visualmente?

Muestra	Escala				
	Extremadamente	Mucho	Moderadamente	Poco	Nada
P25T					
P45T					

2. ¿Considera que el producto tiene un olor agradable?

Muestra	Escala				
	Extremadamente	Mucho	Moderadamente	Poco	Nada
P25T					
P45T					

3. ¿Qué tanto considera que se conserva el sabor natural del producto?

Muestra	Escala				
	Extremadamente	Mucho	Moderadamente	Poco	Nada
P25T					
P45T					

4. ¿Qué tanto le gusta el sabor del producto?

Muestra	Escala				
	Extremadamente	Mucho	Moderadamente	Poco	Nada
P25T					
P45T					

5. ¿Qué tan crocante le parece el producto?

Muestra	Escala				
	Extremadamente	Mucho	Moderadamente	Poco	Nada
P25T					
P45T					

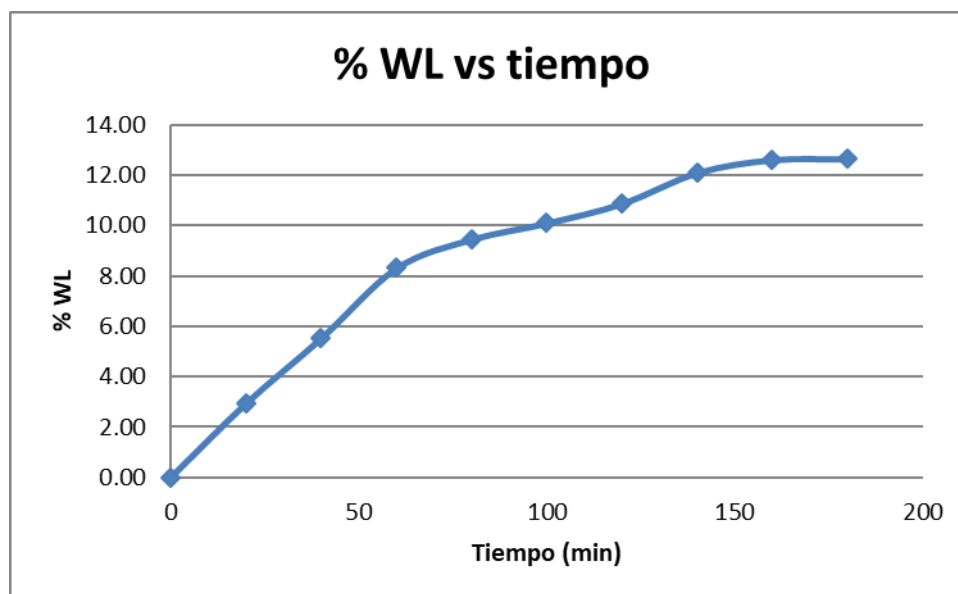
6. ¿Tiene algún comentario u observación respecto al producto presentado?

ANEXO 4: TABLAS Y GRÁFICAS PARA LA MEDICIÓN DE %WL

Tabla K. Parámetros medidos para la muestra a 90°C, 25 °Bx y con pretratamiento de trehalosa.

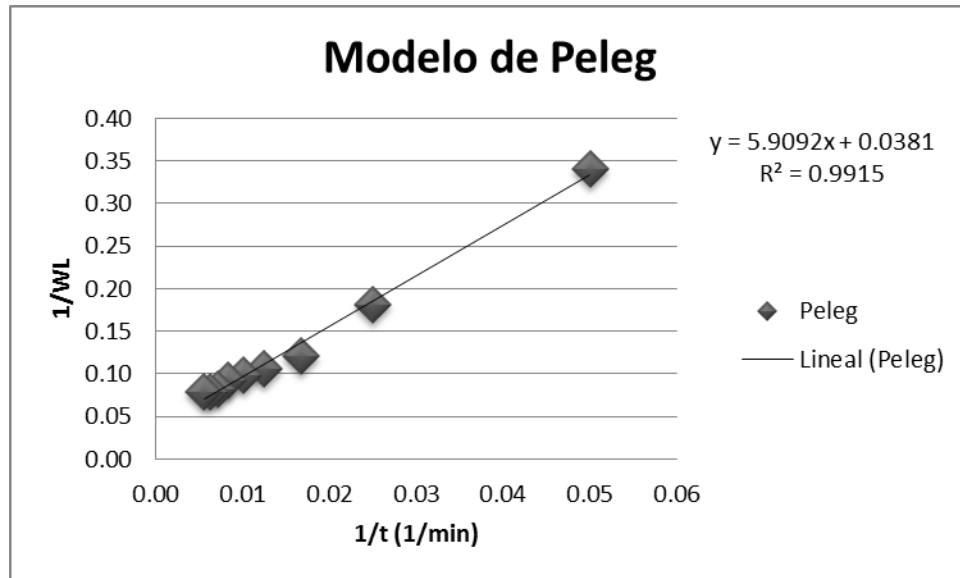
<i>Trehalosa 25°Bx</i>						<i>PELEG</i>		<i>HAWKES</i>
<i>Tiempo</i>	<i>Peso</i>	<i>°Brix</i>	<i>%WR</i>	<i>%SG</i>	<i>%WL</i>	<i>1/WL</i>	<i>1/t</i>	<i>t^{1/2}</i>
0	442.96	16	0.00	0.00	0.00	-	-	0
20	429.94	16	2.94	0.00	2.94	0.3402	0.0500	4.47
40	417.46	17	5.76	-0.23	5.53	0.1808	0.0250	6.32
60	404.14	18	8.76	-0.45	8.31	0.1203	0.0167	7.75
80	398.58	18.5	10.02	-0.56	9.45	0.1058	0.0125	8.94
100	395.22	19	10.78	-0.68	10.10	0.0990	0.0100	10.00
120	390.56	20.2	11.83	-0.95	10.88	0.0919	0.0083	10.95
140	384.33	21	13.24	-1.13	12.11	0.0826	0.0071	11.83
160	381.05	22	13.98	-1.35	12.62	0.0792	0.0063	12.65
180	379.33	23.6	14.36	-1.72	12.65	0.0791	0.0056	13.42

Gráfica L. Porcentaje de pérdida de agua respecto al tiempo.



ANEXO 5: GRÁFICAS PARA EL MODELO DE PELEG Y LA ECUACIÓN DE HAWKES Y FLINK

Gráfica I. Modelo de la ecuación de Peleg



Gráfica J. Modelo de la ecuación de Hawkes y Flink

