

Universidad Nacional Autónoma de México



FACULTAD DE QUÍMICA

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

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA:

María Montserrat Aranda González

ASESOR:

M. Víctor Alberto Corvera Pillado



Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: PROF: Tecante Coronel Alberto

Vocal: PROF: Miranda Martínez Inés

Secretario: PROF: Corvera Pillado Víctor Alberto

Suplente 1: PROF: Aburto Anell Jorge Arturo

Suplente 2: PROF: Ríos Días Sandra Teresita

**Sitio donde se desarrolló el tema: Facultad de Estudios Superiores Zaragoza
Campo 2, Laboratorio ET-PA-24**

Asesor del tema:

Mtro. Víctor Alberto Corvera Pillado

Sustentante:

María Montserrat Aranda González.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Páginas
Índice general_____	III
Lista de Tablas_____	VI
Lista de Figuras_____	VII
RESUMEN_____	1
INTRODUCCIÓN_____	2
CAPITULO 1. ANTECEDENTES_____	4
1.1.1 El Aguacate_____	4
1.1.2 Razas y variedades de aguacate_____	6
1.1.3 Composición química del aguacate y beneficios a la salud_____	7
1.2 Cambios fisiológicos y bioquímicos que ocurren durante el proceso de maduración del aguacate_____	9
1.2.1 Cambios de color y oscurecimiento del aguacate_____	9
1.2.1.1 Métodos para la prevención del oscurecimiento_____	11
1.3.1 Deshidratación osmótica_____	12
1.3.1.1 Variables involucradas en el proceso de deshidratación osmótica_____	15
1.3.1.2 Modelado de la deshidratación osmótica_____	17
1.3.1.3 Cinética de la deshidratación osmótica_____	18
1.3.1.4 Cálculo del coeficiente de difusividad y ley de Fick_____	19
1.4 Secado convectivo por arrastre de aire_____	21
1.4.1 Secador de túnel_____	22
1.4.2 Curvas de velocidad de secado por convección forzada_____	22
1.4.3 Transferencia de materia en el secado por convección forzada_____	24
1.5 Producción de aguacate Hass en México_____	25
1.5.1 Principales países productores de aguacate_____	27

1.6 Evaluación sensorial _____	29
1.6.1 Prueba de nivel de agrado _____	30
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS _____	30
2.1 Objetivo general _____	30
2.2 Objetivos particulares _____	30
CAPÍTULO 3 MATERIALES Y METODOS _____	31
3.1 Cuadro metodológico _____	31
3.2 Materiales y métodos _____	32
3.3 Curvas de secado osmótico _____	37
3.4 Coeficiente de difusividad de agua y sólidos _____	38
3.5 Elaboración de las curvas de secado por convección forzada _____	40
3.6 Análisis químico proximal _____	41
3.6.1 Contenido de humedad _____	41
3.6.2 Contenido de cenizas _____	42
3.6.3 Contenido de proteína _____	43
3.6.4 Contenido de hidratos de carbono reductores totales _____	44
3.6.5 Contenido de lípidos _____	45
3.6.5.1 Análisis de identidad de los aceites obtenidos _____	46
3.6.2 Análisis de calidad de los aceites obtenidos _____	48
3.7 Evaluación sensorial _____	49
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN _____	50
4.1.1 Cinética del secado osmótico _____	50
4.1.2 Discusión de los resultados del secado osmótico _____	53
4.2.1 Cinética de secado convectivo por arrastre de aire _____	59
4.2.2 Discusión de los resultados de la cinética de secado convectivo por arrastre de aire _____	65
4.3 Composición proximal _____	67

4.4 Calidad de las tiras de pulpa de aguacate deshidratadas por el método combinado	70
4.4.2 Análisis de calidad los aceites obtenidos. Efecto del secado combinado sobre del aceite extraído las tiras de pulpa de aguacate por medio del índice de peróxido (IP) e índice de yodo (IY)	71
4.5 Evaluación sensorial del producto	74
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS	83
ANEXO A Hoja de prueba evaluación sensorial	89
ANEXO B Análisis estadístico	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación botánica del aguacate	4
Tabla 1.2 Composición química del aguacate variedad Hass	7
Tabla 1.3 Niveles de maduración del aguacate variedad Hass	9
Tabla 1.4 Producción nacional de aguacate de los principales estados productores en el año 2012	26
Tabla 3.1 Condiciones para secado osmótico de las tiras de pulpa de Aguacate	35
Tabla 3.2 Condiciones para secado combinado de las tiras de pulpa de Aguacate	37
Tabla 4.1 Coeficiente de difusividad de agua (Dew) y sólidos (Des) del secado osmótico efectuado a las tiras de pulpa de aguacate	53
Tabla 4.2 Porcentaje de humedad base húmeda inicial y final, duración de secado convectivo con aire a temperatura de 25 °C de la tiras de pulpa de aguacate previamente sometidas a una deshidratación osmótica con sacarosa a 40 y 60 % (m/v) y tres temperaturas (25, 35 y 45 °C)	64
Tabla 4.3 Coeficiente de difusividad efectiva de agua durante el secado por arrastre de aire de las tiras de pulpa de aguacate con y sin pretratamiento osmótico	65
Tabla 4.4 Composición química proximal expresada en porcentaje de la base seca de las tiras de pulpa de aguacate después de los tratamientos de secado combinado y grupo control	68
Tabla 4.5 Frecuencia de agrado representada en porcentaje de las diferente muestras evaluadas por 54 jueces	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Partes del fruto de aguacate	5
Figura.1.2 Mecanismos de transferencia de masa para la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas	13
Figura 1.3 Representación de los diferentes periodos de velocidad de secado y su humedad libre	23
Figura 1.4 Producción nacional por variedad 2012 (toneladas)	26
Figura 1.5 Porcentaje de producción por estado en el año 2012	27
Figura 1.6 Porcentaje de los principales países productores de aguacate en el año 2012	27
Figura 3.1 Diagrama general	31
Figura 3.2 Rebanadora marca, Bermex 250-ST	33
Figura 3.3 Incubadora marca Cole Palmer	34
Figura 3.4 Prototipo de quipo secador tipo túnel (desarrollado en la FES Zaragoza, campus 2., laboratorio ET-PA24)	36
Figura 3.5 Obtención del coeficiente de difusión (Dew)	39
Figura 3.6 Estufa marca Cole Palmer	41
Figura 3.7 Mufla marca Vulcan	43
Figura 3.8 Equipo micro Kjeldahl	44
Figura 3.9 Equipo extracción de grasas Goldfish	46
Figura 4.1 Variación del porcentaje de humedad base húmeda en función del tiempo, durante la deshidratación osmótica de las tiras de pulpa de aguacate con solución de sacarosa	50
Figura 4.2 Cinética de pérdida de agua (WL) de tiras de pulpa de aguacate para todos los tratamientos realizados	51
Figura 4.3 Cinética de ganancia de sólidos (SG) de tiras de pulpa de aguacate para todos los tratamientos realizados	52
Figura 4.4 Obtención del coeficiente de difusividad (Dew) para SO6	52

Figura 4.5 Curva experimental de secado convectivo por arrastre de aire, humedad base humedad en función del tiempo de las tiras de pulpa de aguacate variedad Hass sin deshidratación osmótica_____	60
Figura 4.6 Curva experimental de humedad libre en función del tiempo de las tiras de pulpa de aguacate variedad Hass sin deshidratación osmótica_____	60
Figura 4.7 Curvas experimentales de humedad libre en función del tiempo de las muestras de pulpa de aguacate variedad Hass con pretratamiento osmótico____	61
Figura 4.8 Curva de Flux de secado convectivo en función del tiempo para las muestras de pulpa de aguacate variedad Hass sin deshidratación osmótica.____	61
Figura 4.9 Curvas de Flux de secado convectivo en función del tiempo de las muestras de pulpa de aguacate variedad Hass con pretratamiento osmótico____	62
Figura 4.10 Curva de Flux de secado en función de humedad libre, para las muestras de pulpa de aguacate sin deshidratación osmótica_____	62
Figura 4.11 Curvas de Flux de secado en función de humedad libre, para las muestras de pulpa de aguacate con pretratamiento osmótico_____	63
Figura 4.12 Obtención del coeficiente de difusividad (Dew) para SC6_____	64
Figura 4.13 Fotografías de las tiras de pulpa de aguacate variedad Hass deshidratadas por medio del método combinado (osmótico y convectivo) junto a una tira de pulpa de aguacate fresca tomada como grupo control y una tira de pulpa de aguacate secada sólo por medio del secado convectivo (SCO)_____	70
Figura 4.14 Determinación de índice de peróxido en aceites extraídos de muestras deshidratadas por medio del método combinado_____	71
Figura 4.15 Determinación del índice de yodo en aceites extraídos de muestras deshidratadas por medio del método combinado_____	73
Figura 4.16 Porcentaje de consumo de aguacate fresco_____	75
Figura 4.17 Porcentaje de consumo de alimentos deshidratados_____	75
Figura 4.18 Comparación nivel de agrado entre las muestras deshidratadas por medio del método combinado_____	77
Figura 4.19 Porcentaje de personas que consumirían regularmente tiras de pulpa de aguacate deshidratadas_____	79

RESUMEN

En este trabajo se realiza un estudio sobre el proceso de conservación de la pulpa de aguacate por medio de un secado combinado; se inició con una deshidratación osmótica a diferentes temperaturas (25 °C, 35 °C y 45 °C) y usando diferentes concentraciones de sacarosa (40 y 60 % m/v). Posterior a la deshidratación osmótica se realizó un secado convectivo por arrastre de aire a 25 °C y una velocidad de aire de 3.2 m/s, usando un prototipo de equipo secador tipo túnel diseñado en la FES Zaragoza.

Durante los secados se verificó el comportamiento cinético de los procesos; para la deshidratación osmótica se elaboraron las curvas de pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) por medio de los datos experimentales. Los resultados demostraron que el tratamiento SO6 (45 °C y 60 % m/v) logró ser el más efectivo en esta etapa al hacer la mayor extracción de agua del fruto quedando con una humedad de 21.1 % y mostrar ser significativamente diferente a los demás tratamientos, de acuerdo a los resultados de la prueba de Tukey a un nivel de confianza del 95%, para los datos de WL. Asimismo se determinaron los coeficientes de difusividad para la deshidratación osmótica los cuales mostraron que la difusión es un fenómeno dependiente de la temperatura y en menor medida de la concentración mientras que el coeficiente de difusividad de sólidos se encuentra mayormente influenciado por la concentración.

Por medio de las curvas de secado de convección forzada se encontró que este proceso está mayormente controlado por el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente y que el tratamiento SC6 obtuvo el menor tiempo de secado (140 minutos). Después de las operaciones de deshidratación las muestras son comparadas por medio de parámetros fisicoquímicos de calidad y análisis sensorial; a partir de estos resultados se pudo determinar que el grupo SC5 obtuvo la mejor evaluación en términos de agrado.

INTRODUCCIÓN.

El aguacate es una fruta originaria de América Central y el sur de México. Su crecimiento incluye diversos hábitats, desde el nivel del mar hasta más de 3000 metros sobre este nivel, cubriendo un amplio intervalo de climas y tipos de suelo. Por ello surgió una gran diversidad genética y adaptabilidad. México es el mayor productor y consumidor de aguacate, seguido por Indonesia y los Estados Unidos de América. Esto representa una oportunidad para explorar nuevas tecnologías que permitan obtener productos derivados de este fruto capaces de satisfacer la necesidad de productos alternativos y ampliar el mercado alimenticio. Sin embargo, el rico contenido en agua y lípidos representa una problemática para su conservación

En el mercado internacional, una de las variedades más apetecidas es la llamada Hass. El aguacate variedad Hass pertenece a la familia de las Lauraceas y a la especie *Persea americana*. Es una fruta muy apreciada por sus cualidades sensoriales y nutritivas pero altamente perecederas por ello se requiere de un manejo adecuado para su conservación poscosecha (FAO 1990). Algunos de los problemas que se deben enfrentar son: el oscurecimiento enzimático de la pulpa debido al complejo polifenol oxidasa, la generación de sabores y olores desagradables, la consistencia frágil de su pulpa que dificulta su manipulación y la manera cotidiana de consumo, por ello se requiere mantener las características sensoriales como el color en el producto procesado, que deben ser similares al de la pulpa fresca.

Entre los métodos de conservación de alimentos más utilizados, destaca el secado que permite almacenar por largos periodos de tiempo un alimento con un mínimo de alteración en sus propiedades funcionales, disminuyendo así la posibilidad de deterioro por proliferación de microorganismos y reduciendo la velocidad de otros mecanismos de descomposición como las reacciones de

oxidación y las enzimáticas. La deshidratación osmótica, es un método de secado el cual puede resultar muy eficiente y económico, aunque es necesario realizarlo como un pretratamiento, pues una deshidratación osmótica no produce productos estables a temperatura ambiente debido a que no hay una gran eliminación de humedad, por ello es necesario complementar este tratamiento con una segunda fase, como el secado por convección forzada, con el cual se busca estabilizar el alimento, alargar su vida de anaquel y conservar sus características sensoriales.

En términos generales, la deshidratación osmótica consiste en sumergir trozos de alimento en una solución hipertónica, originándose dos flujos principales: una salida de agua desde el alimento hacia la solución y una entrada de solutos desde la solución hacia el alimento. Ambos flujos se ven afectados por factores tales como la temperatura de trabajo, la concentración de la solución, el tipo de soluto usado y las características propias del alimento. La idea es disminuir la actividad de agua a través de su eliminación y/o ingresando solutos al alimento, de tal forma que se reduzca el agua disponible del alimento, necesaria para el desarrollo de funciones metabólicas y el crecimiento de microorganismos.

El secado por convección forzada se realizó en un secador de túnel, que se construyó en la FES Zaragoza, el cual se opera a una temperatura y velocidad de flujo de aire regulable.

Las cinéticas de ambos procesos de secado se analizaron con los conceptos teóricos de transferencia de masa. Las principales variables estudiadas en secado osmótico son la concentración del agente osmótico y la temperatura con las cuales podemos obtener los coeficientes de difusividad, a través de la aplicación de la solución a la segunda ley de Fick en condiciones inicial y de frontera específica. Finalmente con los resultados obtenidos de los secados junto a los resultados de los parámetros fisicoquímicos de calidad y análisis sensorial se puede saber con cuáles condiciones se logra una mejor conservación de la pulpa de aguacate.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1.1 El Aguacate

El aguacate es nativo de América, su nombre se deriva del náhuatl “ahuacacuáhuatl” que significa árbol de los testículos donde “ahuacatl” significa testículo y “cuáhuatl” árbol (InfoAserca.2002). Su nombre científico es *Persea americana* y pertenece a la familia vegetal de las Lauráceas, la cual cuenta con más de 50 géneros, entre los que destaca *Persea* (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Clasificación botánica del aguacate

Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Tracheobionta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Orden	<i>Lurales</i>
Familia	<i>Lauraceae</i>
Genero	<i>Persea</i>
Especie	<i>Americana</i>
Nombre Binomial	<i>Persea americana Mill</i>

Fuente: Yáñez, 2009

Cuando los españoles llegaron a América nombraron a este fruto como pera de las indias, debido a la semejanza que poseían con las peras españolas. Sin embargo el término aguacate se ha corrompido y en regiones de Sudamérica es conocido como “palta”; en países de habla inglesa se conoce como “avocado”, en francés como “avocatier” y “abacate” en portugués (Yáñez, 2009).

El árbol de aguacate se originó en Mesoamérica, que corresponde a la región alta del centro de México y Guatemala generándose aquí la domesticación del fruto.

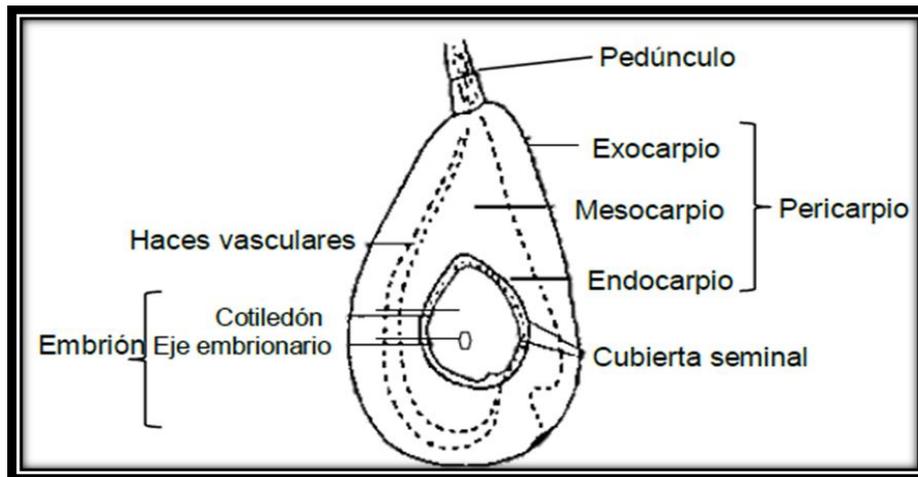
La antigüedad del aguacate es de aproximadamente 8000 años, los restos fósiles, encontrados en el valle de Tehuacán en el estado de Puebla en la cueva de Coxcatlan dan cuenta de ello.

El aguacate domesticado se extendió entre las civilizaciones nativas por varias regiones de México y Centroamérica, promoviéndose así la diversidad genética facilitando la adaptación del aguacate a diversas regiones.

Botánicamente la fruta del aguacate se compone de un exocarpio o cáscara, un mesocarpio carnoso, endocarpio delgado y carnoso, y la semilla. (Figura 1.1).

La pulpa o mesocarpio contribuye con 50 a 80 % del total del fruto, mientras que la semilla del aguacate consta de 10 a 25 % del peso total del fruto (Lewis, 1978).

Figura 1.1 Partes del fruto de aguacate



Fuente: Anatomy of the avocado fruit, Cummings y Schroeder (1942).

El aguacate es un alimento que puede ser consumido en fresco, garantizando la ingesta total de sus nutrientes; evitando la pérdida de vitaminas, y la desnaturalización de las proteínas, que habitualmente sufren la mayoría de los

alimentos durante su procesamiento y cocción. Es un excelente alimento, rico en nutrimentos, ya que los contiene tanto en calidad, cantidad y un armónico balance que permite su óptimo aprovechamiento (Proceedings V World Avocado Congress, 2003).

1.1.2 Razas y variedades de aguacate

Básicamente existen tres razas o variedades botánicas de aguacate:

- Mexicana (*Persea americana* ssp. *drymifolia*, aoacaquauitl) la cual se caracteriza por su resistencia al frío, por su alto contenido de aceite y los frutos presentan tamaño pequeño. Se desarrolla en regiones con altura de 1500 a 2000 metros sobre el nivel del mar (msnm).
- Guatemalteca (*Persea americana* ssp. *guatemalensis*, tlacacoloacatl), que tiene como principal característica poseer cáscara gruesa y se desarrolla en zonas con altura 500 a 1000 msnm.
- Antillana (*Persea americana* ssp. *americana*, quilaoacatl) la cual se adapta a climas tropicales y es más tolerante a la salinidad. Además el tamaño del fruto es mayor que las otras razas, posee un bajo contenido de aceite mientras que su semilla es más grande que las semillas de otras variedades. Probablemente esta variedad se originó en el sur de México (Yucatán) y en Centroamérica (El Salvador, Nicaragua) y crece en regiones con menos de 500 msnm.

De estas tres razas se han realizado cruza para lograr un mejoramiento genético y se han obtenido variedades mejoradas.

La variedad Hass es un ejemplo del resultado del mejoramiento genético que se cree que proviene de la cruza entre la variedad mexicana y guatemalteca. Esta se distingue porque su piel se vuelve de verde al verde purino cuando madura. Fue llamada así por el señor Rudolph Hass, patentada en 1935, esta variedad llamó la atención por su calidad y su resistencia al frío. Posee una forma oval, cáscara

gruesa que se oscurece al madurar, es de textura suave, cremosa y de gran sabor, su peso va de 120 hasta 400 g, este cultivo se produce todo el año (Reyes, 2010).

1.1.3 Composición química del aguacate y beneficios para la salud

La pulpa del aguacate se caracteriza por su un alto contenido de proteínas, minerales y lípidos. Los ácidos grasos predominantes son el oleico, linoleico y palmítico, aunque las proporciones varían dependiendo del estado fisiológico o madurez, variedad y localización (Hernández, 1979). En la Tabla 1.2, se ilustra la composición de la variedad Hass.

Tabla 1.2 Composición química del aguacate variedad Hass.

Contenido energético de los componentes digeribles de 100 gramos de porción comestible			
Agua	68.4 g	Hidratos de carbono	8.5 g
Grasa	14.1 g	Fibra	5.7 g
Proteínas	1.9 g	Sales minerales	1.4 g
Energía	234 Kcal		
Composición detallada de 100g de porción comestible			
Sales minerales		Aminoácidos	
Sodio	3 mg	Arginina	60 mg
Potasio	500 mg	Histidina	30 mg
Magnesio	30 mg	Isoleucina	110 mg
Calcio	10 mg	Leucina	195 mg
Manganeso	140 µg	Lisina	155 mg
Hierro	600 µg	Metionina	45 mg
Cobre	210 µg	Fenilalanina	110 mg
Fósforo	40 µg	Treonina	120 mg
Cloro	6 µg	Tirosina	75 mg
Vitaminas		Valina	170 mg
Carotenos	70 µg	Hidratos de carbono	
Vitamina E	1,300 µg	Glucosa	100 mg
Vitamina K	8 µg	Fructosa	200 mg
Vitamina B1	80 µg	Sacarosa	100 mg
Vitamina B2	150 µg	Lípidos	

Nicotinamida	1100 µg	Ac. Palmítico	3,370 mg
Ácido pantoténico	1100 µg	Ac. Esteárico	Trazas
Vitamina B6	530 µg	Ac. Oléico	15.6 mg
Biotina	10 µg	Ac. Linoléico	1,970 mg
Ácido fólico	30 µg	Ac. Linolénico	90 mg
Vitamina C	13 mg		

Fuente: Senser y Sherz, 1991.

En su valor nutritivo se considera su alto contenido en vitaminas tales como: vitamina E, nicotinamida y ácido pantoténico, así como la presencia de minerales de interés nutricional como el fósforo, hierro, calcio y potasio. Aporta una importante cantidad de vitaminas requeridas por el organismo; a excepción de la vitamina B12, presente sólo en el reino animal (SAGARPA, 2011). Destaca dentro de las vitaminas hidrosolubles un importante porcentaje de ácido ascórbico contenido en este fruto, que potencializa el poder antioxidante de los tocoferoles presentes en la vitamina E.

El aguacate además de tener un sabor muy agradable, tiene efectos nutritivos que benefician la salud del ser humano, ya que se ha demostrado que el aguacate en la dieta tiene un efecto sobre el perfil lipídico en pacientes con dislipidemias; reduce el colesterol total y colesterol LDL y disminuye triglicéridos. Asimismo, el aceite de aguacate produce una elevación del colesterol HDL y una disminución en la extensión de las lesiones aterosclerosas (Méndez, 2006). Es buena fuente de grasas mono insaturadas y poliinsaturadas las cuales producen menos daño al hígado que las grasas saturadas. Es rico en fibra, vitamina B, C, y E; y su alto contenido de potasio y ácido fólico ayudan al cuerpo a producir glutatión, importante para la desintoxicación del hígado ya que uno de los antioxidantes más importantes es el aminoácido glutatión y el aguacate ayuda al cuerpo a producirlo.

El aceite extra virgen del aguacate es más saludable que el aceite de oliva ya que es el único en contener los omegas 3,6 y 9 (SAGARPA, 2011).

1.2 Cambios fisiológicos y bioquímicos que ocurren durante el proceso de maduración del aguacate

Una variedad de cambios bioquímicos caracterizan el proceso de maduración del aguacate los cuales incluyen incrementos en la respiración, producción de etileno, así como a la secuencia de cambios en color, sabor y textura los cuales llevan al estado en que el fruto está apto para ser consumido (Lewis, 1978). La madurez de consumo corresponde con aquel estado de desarrollo de los frutos en que se presentan en su máxima expresión las condiciones organolépticas (Vakis y Papademetriou, 1985) Tabla 1.3. A diferencia de otros frutales, el aguacate al ser un fruto climatérico no alcanza la madurez de consumo en el árbol, sino después de la cosecha (Cutting et al., 1990).

Tabla 1.3 Niveles de maduración del aguacate variedad Hass.

Nivel	Madurez A	Madurez B	Madurez C	Madurez D
	4-5 días para madurar	1-2 días para madurar	0 días para madurar	Vencido
Nombre	Duro	Firme	Maduro	Pasado
Dureza al tacto	Dureza extrema	Firme duro	Firme suave	Blando
Color de la cáscara	Verde-negro	Negro-verde	Negro	Negro púrpura

1.2.1 Cambios de color y oscurecimiento del aguacate

Cuando se aproxima la madurez del fruto de aguacate, comienzan a aparecer cambios en la apariencia por ejemplo en la cáscara, esta comienza a perder su brillo y suavidad dando lugar a un fruto más opaco. Hay una notable reducción del color verde de la pulpa debido a una baja de su contenido de clorofila ya que se

descompone durante la maduración; la degradación de la clorofila ocurre en los cloroplastos a causa la enzima clorofilasa. Después de descomponerse la clorofila comienza un incremento en la síntesis de pigmentos de color amarillo, naranja y rojo (carotenoides y antocianinas).

El oscurecimiento repentino de la pulpa de aguacate puede surgir como consecuencia de un daño físico a las células, por ejemplo, cuando son peladas, cortadas o trituradas y sus tejidos se exponen al contacto con oxígeno del aire, o como consecuencia de golpes o de daños fisiológicos ocasionados en su almacenamiento. Este cambio es causado por la polimerización de quinonas las cuáles son formadas por la oxidación de los compuestos fenólicos, es decir, fenoles simples o monohidratados los cuales son oxidados a polímeros indol-quinona. Estos junto con otros compuestos como taninos y flavonoides también se encuentran involucrados en reacciones oxidativas (Astiasarán, 2000).

La enzima responsable de este oscurecimiento es la 0-difenol-oxígeno-oxirreductasa o también conocida como polifenoloxidasa (PFO), tirosinasa o catecolasa. Es una oxidorreductasa, que cataliza las reacciones en las cuales el oxígeno es el aceptor de hidrógeno y el grupo fenol actúa como donador de hidrogeno. La PFO tiene un peso molecular de 34 000 daltons y contiene un átomo de cobre por molécula. Este átomo de cobre puede ser removido perdiendo actividad de la enzima y recuperando la actividad por adición de Cu^{2+} . El intervalo de actividad óptimo para la enzima se encuentra en valores de pH entre 5 y 7.

El oscurecimiento enzimático es un conjunto complejo de reacciones, que se inicia por las reacciones catalizadas de forma enzimática en donde la enzima PFO, activada por con oxígeno molecular, tiene dos reacciones, una hidroxilando monofenoles a difenoles y la otra oxidando difenoles a quinonas (catecolasa).

A partir de la formación de la quinona, la reacción progresa de forma espontánea. Las quinonas se pueden convertir en trifenoles por reacción con el agua, y

posteriormente oxidarse a hidroxiquinonas. Todas estas moléculas son muy reactivas, dando lugar a polímeros y reaccionando con otras moléculas presentes en el alimento, especialmente proteínas. Los productos finales, llamados melaninas, son de color muy oscuro, o negro, e insoluble en agua.

El control natural de la actividad de la PFO es mediante la compactación de los sustratos. La enzima se encuentra en los plástidos 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 descongelación, se puede producir una reacción de oscurecimiento.

1.2.1.1 Métodos para la prevención del oscurecimiento

La prevención del oscurecimiento utiliza los mismos métodos que se aplican a la inhibición o inactivación de cualquier enzima, entre las cuales tenemos las siguientes:

- Controlar las condiciones de pH. La inmersión de las frutas en agua acidulada, inmediatamente después de peladas o cortadas logra evitar el contacto con el oxígeno del aire y prevenir el oscurecimiento, reduciendo los compuestos o-quinona antes de la polimerización.
- Empleo de antioxidantes, que actúan como reductores de las o-quinonas y/o los o-difenoles, entre los que se tienen ácido ascórbico, dióxido de azufre, butil-hidroxi-anisol (BHA) y butil-hidroxi-tolueno (BHT).
- Inhibidores de las fenolasas como: sulfitos, bisulfitos o metabisulfitos, los cuales forman sulfito-quinonas y evita que se polimerice. El EDTA, es un agente quelante, secuestra el cobre e impide así la actividad de la enzima.

- APH, es una tecnología que utiliza presiones altas de hasta 1500 MPa. Que causan la inactivación microbiana, modificación en reacciones químicas y enzimáticas.
- Tratamiento térmico con agua hirviendo o vapor (escaldado) con lo que se llegan a desnaturalizar las enzimas y con esto inactivarlas.

(Cornejo, 2010)

1.3.1 Deshidratación osmótica

La deshidratación osmótica es un proceso que permite eliminar parcialmente el agua presente en los tejidos de los alimentos por inmersión en una solución hipertónica, sin dañar el alimento y afectar su calidad (Rastogi et al., 2002). Asimismo, es una de las formas más eficientes para remover agua de los alimentos, ya que no tiene que sufrir un cambio de estado (Schwartz, 1994). Comúnmente es aplicada para optimizar la calidad y estabilidad de frutas y hortalizas mejorando las propiedades organolépticas sin tener grandes pérdidas en compuestos aromáticos. Se ha demostrado que con la aplicación de este proceso se tiene la versatilidad de obtener productos finales, o puede ser utilizada como una operación previa a procesos como el secado o la liofilización disminuyendo los costos energéticos (Sharman, 2003).

Para comprender de mejor manera la deshidratación osmótica es importante conocer conceptos fundamentales, como la presión osmótica y la osmosis.

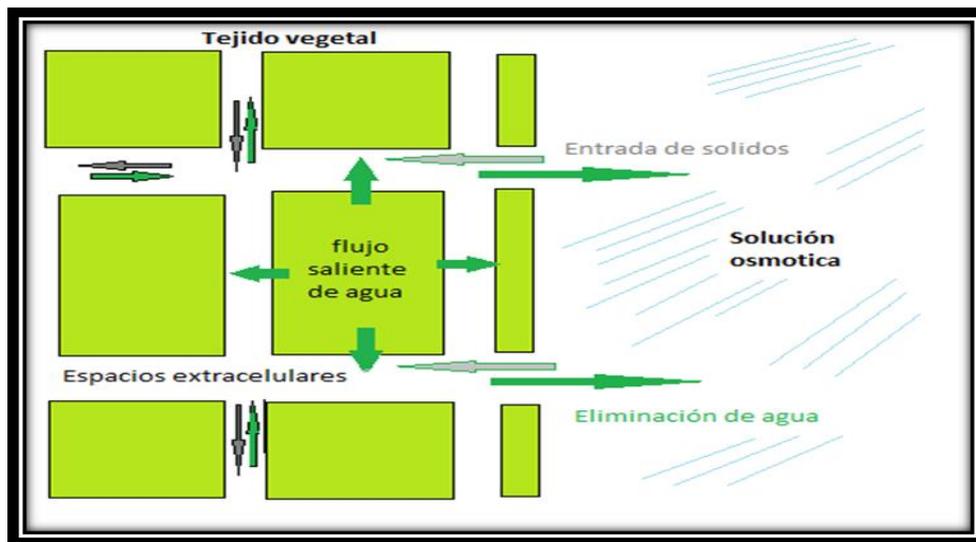
La presión osmótica es la fuerza impulsora, por diferencia de actividad de agua entre el alimento y la solución, que logra la difusión de agua desde los tejidos del alimento a través de una membrana semipermeable a la solución. La presión osmótica es una propiedad coligativa de una solución; es decir, es directamente proporcional al número de moléculas de soluto disueltas en una cantidad dada de disolvente (Devlin, 1982). Con base en esto se puede deducir que si la concentración de los solutos es alta, la presión osmótica será mayor, y como

resultado, la capacidad de absorber agua de la solución más diluida será mayor, o mayor será su capacidad de ceder agua a la solución más concentrada

La ósmosis consiste en el movimiento de las moléculas que se localizan en una zona de alta concentración a otra zona de baja concentración a través de una membrana semipermeable y esto sucede en cada una de las membranas de cada una de las células que componen el tejido del alimento.

Durante la osmosis las paredes de las células actúan como membranas semipermeables, dejando pasar el agua y reteniendo solutos. Aunque, estas membranas no son en su totalidad selectivas y algunos solutos tales como azúcares, sales, ácidos orgánicos y vitaminas pueden perderse de las células, mientras que los solutos de la solución pueden penetrar dentro del alimento tal como lo muestra la Figura 1.2.

Figura.1.2 Mecanismos de transferencia de masa para la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas.



Fuente: Modelado y Simulación DO-DMO de frutihortícolas, (2013).

El proceso de deshidratación osmótica depende de la existencia de un potencial químico (μ) entre el agua de la fruta y del agua de la solución que rodea. El

potencial químico a su vez, se encuentra relacionado con la actividad de agua (A_w) o la presión osmótica (π) a través de las siguientes ecuaciones:

$$\mu = \mu^0 + RT \ln A_w \quad \text{Ec. (1.1)}$$

$$\pi = (RT/V) \ln (1/A_w) \quad \text{Ec. (1.2)}$$

En donde μ es el potencial químico del agua pura a la temperatura en cuestión y V el volumen molar parcial del agua. Durante una deshidratación osmótica la A_w de solución que rodea a la fruta debe ser menor a ésta y entre mayor sea la diferencia de A_w de la fruta con el medio osmótico, mayor será la transferencia de agua de la fruta a la solución y continuara hasta que se cumpla con el requerimiento termodinámico de que el potencial químico o la A_w sea igual en ambos lados de la membrana semipermeable. (Yahia e Higuera, 1992).

Generalmente, para una deshidratación osmótica se emplean soluciones acuosas concentradas de una sal, azúcar o mezclas de estos. Asimismo, se basa en una remoción significativa de agua frente a una menor entrada de solutos al alimento (Lerici et al., 1985) es así como durante la deshidratación osmótica se originan dos flujos principales y un tercero poco apreciable:

- Un flujo de agua desde el alimento hacia la solución hipertónica,
- Un flujo de soluto(s) desde la solución hipertónica hacia el alimento y,
- Una pérdida por medio del flujo de los solutos solubles propios del alimento (azúcares, sales minerales, ácidos orgánicos, entre otros) que a pesar de ser cuantitativamente despreciable, puede llegar a repercutir a nivel nutricional y organoléptico.

Se ha sugerido que estos flujos ocurren a través de una membrana que posee permeabilidad diferencial y regula en cierto grado la entrada y salida de solutos (Heng et al, 1990). La remoción de agua se realiza por dos mecanismos: flujo capilar y difusivo, mientras que el transporte de solutos ya sea de consumo o de lixiviación se realiza sólo por difusión (Raoult-Wack et al., 1992.)

1.3.1.1 Variables involucradas en el proceso de deshidratación osmótica

Durante el proceso de deshidratación osmótica la cantidad y velocidad de remoción de agua depende de diversas variables, entre las que se encuentran:

- El agente osmótico

Al escoger un agente osmótico se deben considerar varios factores tales como el costo del agente osmótico así como su influencia sobre las características organolépticas del alimento (Rahman y Perera, 1996). Entre los agentes osmóticos más utilizados se encuentra la sacarosa por su alta disponibilidad, costo y sabor agradable; además de que se ha encontrado que es uno de los mejores agentes osmóticos al evitar la pérdida de sabores volátiles y tiene un alto grado de solubilidad, la mayoría de las membranas celulares son impermeables a ella y su difusividad es mucho más baja que la de agua (Sharman et al., 2003).

El cloruro de sodio es otro agente osmótico frecuentemente utilizado para el tratamiento de vegetales, pescados y carnes; aunque también distintas mezclas de agentes osmóticos han sido probados.

Otros agentes osmóticos útiles, pueden ser: glucosa, fructosa, dextrosa, lactosa, maltosa, polisacáridos, maltodextrina, jarabes de almidón de maíz y sus mezclas.

- La concentración de la solución osmótica

Con el aumento de la concentración de la solución osmótica, la pérdida de agua y la velocidad de secado aumentan, debido a que la actividad de agua de la solución decrece con un aumento en la concentración de solutos (Lenart y Flink, 1984a). Aunque también existen problemas al aumentar en exceso la concentración del agente osmótico pues con el aumento en la concentración de la solución osmótica se forma una capa de soluto sobre la superficie del producto que actúa como

barrera reduciendo la pérdida de nutrientes aunque a muy altas concentraciones, pueden dificultar también la pérdida de agua (Saurel et al., 1994).

- La temperatura de la solución osmótica

La temperatura es el parámetro que llega a afectar de manera más significativa dentro de la cinética de pérdida de agua y ganancia de solutos. La ganancia de solutos es afectada en menor medida que la pérdida de agua, debido a que con elevadas temperaturas el soluto no puede difundir tan fácilmente como el agua a través de la membrana celular de los tejidos del alimento.

La temperatura causa dos efectos durante la deshidratación osmótica. La agitación molecular es uno de ellos la cual es favorecida por el aumento de la temperatura y por consiguiente mejora la velocidad de difusión. El otro es la alteración de la permeabilidad de la membrana celular al aumentar la temperatura.

- El pH de la solución

Al disminuir el pH en la solución osmótica puede incrementar la pérdida de agua ya que se originan cambios en las propiedades tisulares y en consecuencia se producen cambios en la textura, que agilizan la eliminación de agua de los vegetales y frutas.

- Las propiedades del soluto

El proceso de deshidratación osmótica también se ve influenciado por las propiedades fisicoquímicas de los solutos empleados, como son: pesos moleculares, estado iónico y solubilidad del soluto en agua. Esta última puede delimitar la máxima concentración de soluto que puede emplearse en la solución. Al utilizar soluciones con solutos de alto peso molecular, la pérdida de agua se favorece y la ganancia de solutos resulta mucho menor que cuando se usa un soluto de bajo peso molecular. La combinación de dos o más solutos en la

solución puede hacer más eficiente la deshidratación al proporcionar cada uno de ellos la ventaja que los caracteriza (Grabowski et al., 1994).

- Las propiedades fisicoquímicas del alimento

La composición química del alimento (hidratos de carbono, proteínas, grasas y contenido de sal), así como su estructura física (arreglo celular, porosidad y orientación de fibras) y los pretratamientos pueden llegar a afectar la cinética de deshidratación osmótica.

- La agitación de la solución osmótica

La deshidratación osmótica puede mejorar por medio de la agitación. Con ella se puede disminuir la resistencia a la transferencia de masa en la superficie del alimento, además de que con esta se puede homogeneizar la concentración de solutos y temperatura en la solución. Sin embargo con su uso puede dañarse el alimento.

- El tamaño del alimento y su geometría

Tanto la geometría como el tamaño del alimento que será sometido a una deshidratación osmótica son de gran importancia ya que la difusión variará de acuerdo con la superficie expuesta por unidad de volumen.

- La relación alimento y masa de solución

La pérdida de agua y la ganancia de solutos crecen con un aumento de la relación masa de solución a masa de producto.

1.3.1.2 Modelado de la deshidratación osmótica

Diferentes mecanismos de transporte de masa coexisten durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas. El desarrollo de un modelo completo que involucre a todas las variables descritas con anterioridad es muy difícil. A pesar de que ya

han sido desarrollados modelos más simples como el de Saputra (2001) en el que pueden representar los datos experimentales, analizando la deshidratación osmótica como un proceso complejo de contra difusión simultáneo de agua y solutos, en él que podemos reconocer tres flujos principales como son el flujo de agua del producto a la solución, flujo de los solutos de la solución al producto y el flujo de los solutos solubles en el agua desde el producto a la solución (azúcares, ácidos orgánicos, minerales y vitaminas); generalmente, este último flujo se desprecia para los efectos del modelado, pues aunque es importante en las características organolépticas y nutricionales del alimento, es muy pequeño si se lo compara con los otros dos flujos (Sablani et al., 2002).

A través de las paredes celulares de la superficie del producto se realiza la penetración de solutos pertenecientes a la solución osmótica para posteriormente difundirse a los espacios intracelulares. La existencia de estos dos flujos de transferencia de masa simultáneos durante la deshidratación osmótica, obstaculiza el modelamiento matemático de lo que en una dirección es ganancia de sólidos y en la otra la pérdida de agua (Biswal y Le Maguer, 1989). Además, estos flujos ocurren en una condición fuerte de no equilibrio, acompañada por un importante proceso de encogimiento y deformación del tejido vegetal (Lenart y Flink, 1984b) y posiblemente por interacciones entre los diferentes flujos.

1.3.1.3 Cinética de la deshidratación osmótica

Con el fin de describir el progreso de deshidratación osmótica, usualmente se analiza en términos de pérdida de agua (WL) y ganancia de solutos o sólidos (SG). Estas son los principales parámetros cinéticos, que se pueden calcular durante la deshidratación osmótica mediante las siguientes ecuaciones (Azuara et al., 1992):

$$WL = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{M_0} \times 100 \quad \text{Ec. (1.3)}$$

$$SG = \frac{(m - m_0)}{M_0} \times 100 \quad \text{Ec. (1.4)}$$

Donde:

WL= pérdida de agua,

SG = Ganancia de sólidos,

M_0 = masa inicial del alimento (g),

M = masa del alimento después del tratamiento (g),

m = masa seca del alimento después del tratamiento (g),

m_0 = masa seca del alimento al inicio (g).

Las anteriores ecuaciones se basan en la suposición de que la cantidad de sólidos que salen de la muestra son insignificantes y de este modo la muestra sólo pierde agua y recoge soluto (Sharma et al., 1991).

1.3.1.4 Cálculo del coeficiente de difusividad y ley de Fick

Los mecanismos por los que se lleva a cabo la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica son: la difusión, que se origina por un gradiente de concentración, y la convección que se origina mediante el movimiento de una sustancia fluente a causa de un gradiente de temperatura (Lobo, 1997).

La difusión puede definirse como la transferencia o desplazamiento de moléculas individuales a través de un fluido. Existen varios métodos descritos en la literatura, para la estimación de los coeficientes de difusión de humedad y sólidos durante la DO entre ellos encontramos modelos empíricos y semiempíricos pero por lo

general, cuando se quiere utilizar un modelo fenomenológico para procesos llevados a cabo a presión atmosférica se emplea la solución de Crank a la segunda ley de Fick la cual consiste en un grupo de soluciones para diferentes geometrías, condiciones límites y condiciones iniciales, que describe el mecanismo difusional. Con esta solución se estima la difusividad efectiva (D_{ef}) de agua (D_w) y de los sólidos (D_s), resolviendo las ecuaciones analíticas o numéricamente. Pero las suposiciones que se hacen no siempre son fáciles de lograr lo que implica grandes limitaciones (Parjoko et al., 1996)

Consideraciones del modelo de difusión de Fick:

- Se asume que la solución osmótica es un medio semi infinito; en consecuencia se requiere una relación masa de solución a masa de alimento muy grande
- La concentración de la solución osmótica y la temperatura son constantes y uniformes en toda la muestra.
- Existen soluciones analíticas para láminas planas, cilindros, cubos y esferas. Se emplean técnicas numéricas para resolver formas irregulares
- Los parámetros de equilibrio se determinan experimentalmente
- Se considera que no hay efecto de los solutos ganados ni de los solutos perdidos en el proceso de difusión de agua
- Se desprecia el encogimiento debido a la transferencia de masa

La determinación de coeficientes de difusión de agua para rebanadas o placas planas de longitud infinita la segunda Ley de Fick para la difusión unidireccional en estado transitorio está dado por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad Ec.(1.5)$$

Donde:

C: concentración,

t: tiempo,

D_{ef} : coeficiente de difusión efectivo o aparente,

X: espesor de la placa en la que se produce la difusión.

Para las siguientes suposiciones y condiciones límites:

Donde C_0 es la concentración inicial y C_1 es la concentración en el seno del fluido

$$C = C_0 \quad \text{a} \quad t = 0$$

$$C = C_1 \quad \text{a} \quad t > 0$$

La solución de la ecuación (1.5) para la difusión de agua es:

$$\frac{[H_2O]_t - [H_2O]_{eq}}{[H_2O]_0 - [H_2O]_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-D_{ew} (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t \right] \quad Ec. (1.6)$$

Donde:

$[H_2O]$: humedad del producto,

D_{ew} : coeficiente de difusividad efectivo de agua,

l = espesor de la muestra,

Los subíndices 0, t y eq. Se refieren a las condiciones iniciales, a cualquier tiempo t y al equilibrio, respectivamente.

1.4 Secado convectivo por arrastre con aire

En el secado convectivo por arrastre con aire la remoción de agua se realiza poniendo el alimento en contacto con un medio, normalmente aire. Este medio se renueva continuamente para que el secado prosiga hasta el grado de deshidratación deseado. Si se trabaja con una misma humedad absoluta del aire, resulta relativamente más seco el alimento cuanto más se incrementa la temperatura, por tal razón el secado por arrastre es a menudo realizado con un flujo de aire caliente. En resumen, en el secado por arrastre, la energía necesaria para la remoción de agua, del alimento, es aportada normalmente por el agente de arrastre (aire seco y caliente normalmente) que cede su calor sensible a la vez que se carga de humedad. Cuando el agente de secado aporta todo el calor

necesario para la evaporación, tenemos un secado adiabático. Esta condición tiene importancia en el diseño del secador.

1.4.1 Secador de túnel

Los secadores continuos de túnel suelen ser compartimentos de charolas o de carretillas que operan en serie. Los sólidos se colocan sobre charolas fijas o en carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos. Muchos alimentos se secan por este procedimiento (Geankoplis, 1995). El tiempo de residencia en el secador debe ser lo suficientemente grande como para reducir al valor deseado el contenido de humedad del sólido. Para operaciones a temperaturas relativamente bajas (25-80 °C), generalmente se calienta el gas mediante aire calentado con vapor. En el secado en túnel se puede lograr una calidad aceptable de frutas deshidratadas; sin embargo, el costo de energía de un deshidratador de túnel puede ser alto comparado con los precios de venta de los productos (Unadi et al., 2002).

1.4.2 Curvas de velocidad de secado por convección forzada

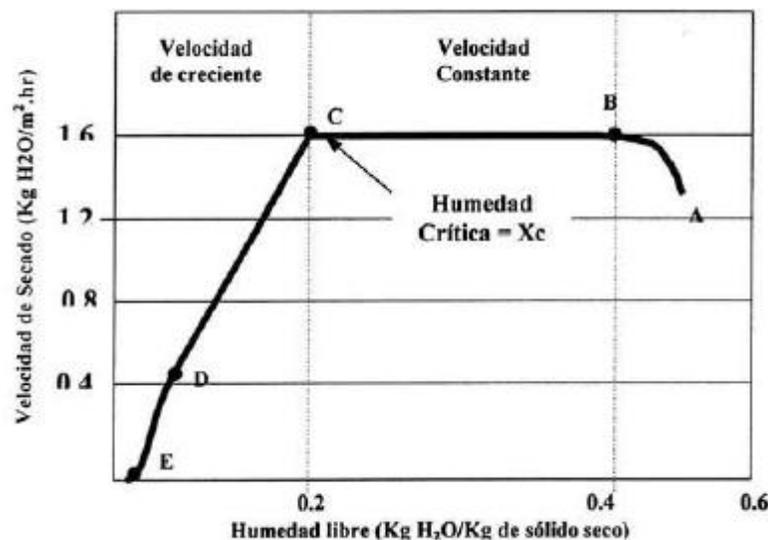
La extracción de agua de un alimento durante la deshidratación se realiza en etapas diferentes. Normalmente, los equipos de secado operan bajo condiciones constantes, esto es, a una temperatura y velocidad de aire constantes. Además, si el espesor de la muestra se considera constante (exceptuando cuando hay fenómenos de encogimiento inducidos por la misma operación de secado), entonces se dice que el secado se lleva a cabo bajo condiciones constantes.

Al secar un sólido húmedo con aire caliente, el aire aporta el calor sensible y el calor latente de vaporización de agua y actúa también como gas portador, para

eliminar el vapor de agua que se forma en la vecindad de la superficie de evaporación.

La velocidad de secado no es la misma durante todo el proceso. La representación gráfica de la velocidad de secado frente a la humedad del producto o frente al tiempo se denomina curva de secado, si se registra el cambio del contenido en agua del producto durante todo el proceso de desecación, los datos se pueden representar como en la Figura 1.3. El estudio de estas gráficas muestra que el ciclo de secado puede descomponerse en varias fases o etapas.

Figura 1.3 Representación de los diferentes periodos de velocidad de secado y su humedad libre



Fuente: Geankoplis (1995)

a) Etapa [AB]: Periodo de estabilización. El alimento se encuentra inicialmente en el punto A. En la etapa inicial de secado [AB] el agua se calienta lentamente cuando el alimento y el secador se ajustan a las condiciones de temperatura del aire de secado, En el punto B, la temperatura de la superficie del alimento alcanza su valor de equilibrio.

b) Etapa [BC]: Periodo de velocidad de secado constante. Ocurre cuando el alimento ya se encuentra en equilibrio térmico con el aire de secado; en esta etapa se presenta una salida de humedad a velocidad constante, llegando a finalizar cuando se alcanza un punto conocido como humedad crítica, donde se produce un cambio brusco de velocidad. Este último punto es identificado como [C] donde no hay suficiente agua en la superficie para mantener la película continua, siendo este el punto crítico que marca un inicio del periodo decreciente (CD y DE).

c) Etapa [CD]: Primer periodo de velocidad decreciente. En este último punto, la velocidad de secado disminuye conforme la humedad en el interior del producto disminuye. El periodo de velocidad decreciente es por lo general el periodo más largo en una operación de secado.

d) Etapa [DE]: Segundo periodo de velocidad decreciente. En este periodo no presenta una tendencia lineal, lo que indica que el producto se aproxima a su contenido de humedad en equilibrio. Depende de la temperatura, velocidad del aire y del espesor del alimento. Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante este periodo de velocidad decreciente sea pequeña; sin embargo los tiempos de secado pueden ser prolongados.

1.4.3 Transferencia de materia en el secado por convección forzada

La apropiada transferencia de calor o flux, hacia el interior del alimento, depende del gradiente de temperatura entre la superficie y el agua presente en el interior. Al suministrar la energía suficiente para cambiar de fase el agua, el transporte de humedad se realiza del interior hasta la superficie, bajo el control de mecanismos difusionales. La velocidad con la que ocurre el transporte, depende, en gran medida, de la estructura interna del producto, el espesor de la muestra y la temperatura en el interior.

Para estimar el flux de secado de determinado lote de material, el mejor método consiste en obtener datos experimentales reales bajo condiciones de proceso, área superficial relativa expuesta, velocidad del gas, temperatura y humedad. De esta manera, el tiempo requerido para el periodo de velocidad constante se determina directamente con la curva de secado de contenido de humedad libre en función del tiempo (Geankoplis, 1995).

$$X = Xt - X^* \quad Ec. (1.7)$$

Donde:

X = Humedad libre (k de agua libre/ k de sólido seco),

X* = Humedad de equilibrio (k de humedad/k sólido seco),

El proceso completo de transferencia de masa o humedad es descrito por la siguiente ecuación.

$$R = -\frac{W_{ss}}{A} * \frac{dX}{dt} \quad Ec. (1.8)$$

Donde:

R = Flux de secado (k de agua/ h·m²)

W_{ss} = Masa del sólido seco usado (k)

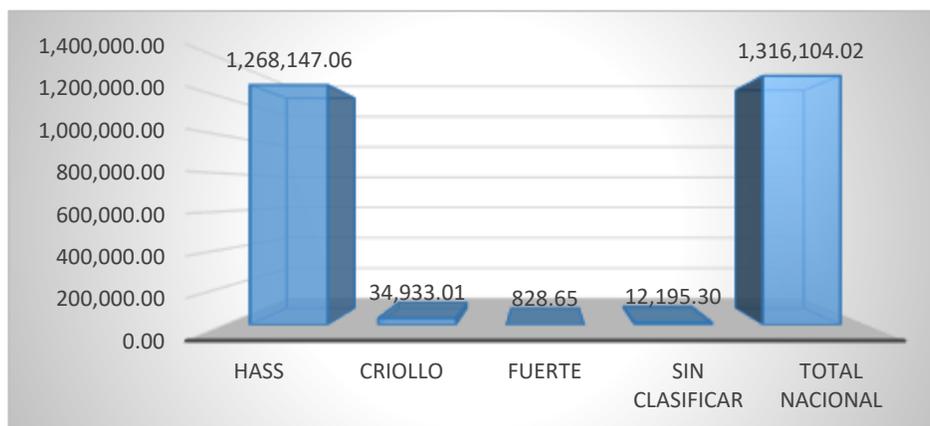
A =Área superficial expuesta al secado (m²)

t=tiempo de duración de proceso (h)

1.5 Producción de aguacate Hass en México

El aguacate es uno de los principales cultivos en México por su importancia económica, e inicia su expansión a principios de la década de los 60's y se da principalmente en el estado de Michoacán. Se observa en la Figura 1.4 que la variedad que más se produce a nivel nacional es la Hass predominando sobre la Fuerte y Criolla, resulta interesante observar en la que para el 2012 la variedad Fuerte casi no se produjo en comparación con la variedad Criolla con 828 toneladas sobre 34,933 toneladas, contrastando considerablemente la producción de Hass con 1, 268,147 toneladas de aguacate.

Figura 1.4 Producción nacional por variedad 2012 (toneladas)



Fuente: Anuario estadístico de la producción agrícola SIAP-SAGARPA

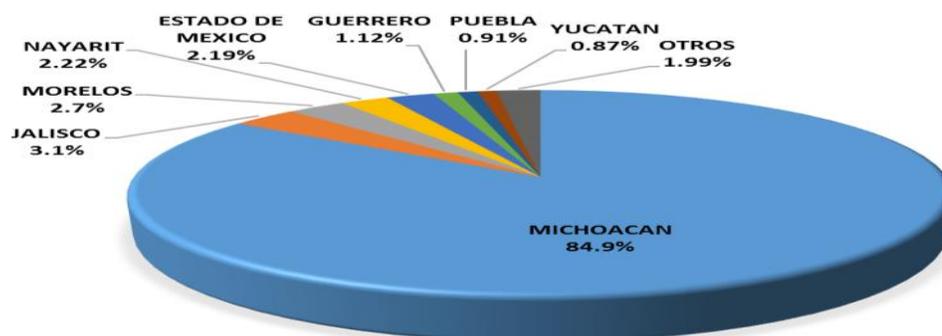
En total son 28 estados de la república mexicana que producen aguacate, pero las entidades federativas que tienen mayor participación son Estado de México, Guerrero Morelos y Oaxaca y principalmente Michoacán que es el mayor productor a nivel nacional, Tabla 1.4 y Figura 1.5.

Tabla 1.4 producción nacional de aguacate de los principales estados productores en el año 2012

Estado	Superficie Sembrada (Ha)	Superficie Cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Valor producción (Miles de pesos)	% Producción
MICHOACAN	112,673.34	105,512.74	1,117,338.49	14,853,697.49	84.9
JALISCO	11,043.11	5,733.60	40,845.96	494,737.38	3.1
MORELOS	3,499.40	3,489.40	35,541.70	275,971.70	2.7
NAYARIT	4,373.71	3,584.71	29,178.01	132,390.91	2.22
ESTADO DE MEXICO	5,125.00	2,614.70	28,765.55	291,729.72	2.19
GUERRERO	2,822.40	2,236.50	14,783.98	135,903.14	1.12
PUEBLA	2,077.89	1,952.39	12,015.15	88,552.93	0.91
YUCATAN	457.50	446.00	11,430.91	42,584.75	0.87
OTROS	8,950.30	4,737.95	26,204.27	310,578.74	1.99
TOTAL	151,022.65	130,307.99	1,316,104.02	16,608,146.76	100

Fuente: Anuario estadístico de la producción agrícola SIAP-SAGARPA

Figura 1.5 Porcentaje de producción por estado en el año 2012

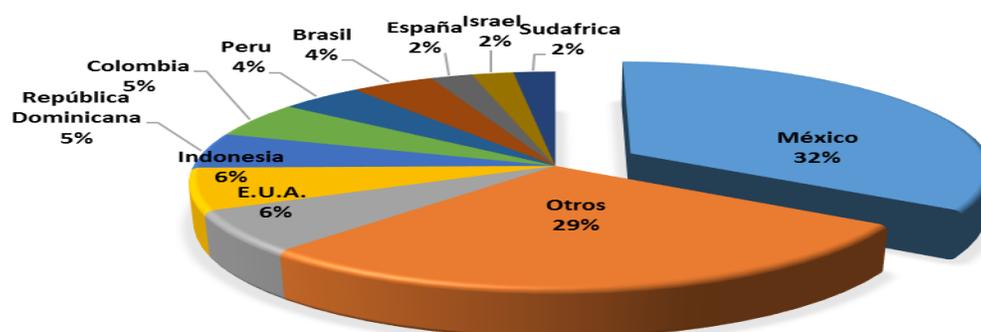


Fuente: FAOSTAT

1.5.1 Principales países productores de aguacate

En la Figura 1.6 se observa a los principales países productores de aguacate, entre ellos están México, Indonesia, Estados Unidos, Republica Dominicana, Colombia, Chile, Perú, Brasil, España, Israel, y Sudáfrica estos países producen 68.5 % del total de la producción mundial, México en cambio, supera por mucho tanto a estos países como al resto representando el 31.5 % de la producción mundial con un promedio de 1, 033,000 toneladas del promedio mundial de 3, 281, 000 toneladas.

Figura 1.6 Porcentaje de los principales países productores de aguacate en el año 2012.



Fuente: FAOSTAT

México además de ser el principal productor mundial de aguacate es también el exportador más importante con un promedio de 180,738 mil toneladas en el periodo de 1997 al 2011 equivalentes al 33 % de las exportaciones mundiales de aguacate, le sigue Chile ahora con el 17 % de las exportaciones mundiales y un promedio de 90,605 mil toneladas exportadas (FAOSTAT).

1.6 Evaluación sensorial

El análisis sensorial es considerado una ciencia multidisciplinaria estructurada a partir de los principios científicos con diferentes áreas de conocimiento tales como ciencia de los alimentos, psicología, estadística, sociología, fisiología humana y conocimiento sobre prácticas de preparación de productos, con el propósito de obtener resultados objetivos de forma en que los alimentos son percibidos por los seres humanos a través de los sentidos (Stone y Sidel, 2004).

Para que un producto alimenticio tenga éxito en el mercado, es necesario que sus características sean aceptadas por el consumidor. Entre las aplicaciones del análisis sensorial, se encuentra: la determinación de normas de calidad, desarrollo de nuevos productos, correlación con medidas físicas, químicas o instrumentales, percepción humana-afectiva, percepción humana/descriptiva entre otras. Para este trabajo se utilizara la percepción humana/afectiva (Pedrero, 1996).

Las pruebas afectivas son aquellas en las cuales el juez expresa su reacción subjetiva ante el producto, estas pruebas son las que presentan mayor variabilidad en los resultados y son más difíciles de interpretar (Anzaldúa, 1994). Esta prueba se utiliza a nivel consumidor para comprender la importancia de las propiedades sensoriales de aceptación/rechazo, así como de preferencia y nivel de agrado, en relación con los atributos del mismo producto.

1.6.1 Prueba de nivel de agrado

Su objetivo es localizar el nivel de agrado o desagrado que provoca una muestra específica, se utiliza una escala estructurada (también llamada escala hedónica). La palabra hedónica significa placer, por lo tanto, las escalas hedónicas son instrumentos de medición de las sensaciones placenteras o desagradables producidas por un alimento a quienes la prueban. La escala hedónica se utiliza para calificar el grado de satisfacción global de la muestra, pero también se sugiere, incluir un cuestionario o sección, en donde el juez exprese sus comentarios, así el investigador podrá tener más información acerca del porqué de su respuesta y no sólo obtener un número, ya que en la prueba por sí sola, no se conoce la causa de la respuesta, no hay una relación directa con respecto a la intensidad o capacidad discriminadora de algún descriptor de la muestra.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Estudiar la deshidratación de la pulpa de aguacate variedad Hass, combinando las metodologías de deshidratación osmótica y secado por convección forzada, analizando la cinética de secado de ambos procesos y los cambios en sus parámetros fisicoquímicos de calidad y sensoriales de los productos finales para así proponer una alternativa de conservación de pulpa de aguacate.

2.2 Objetivos particulares

Analizar el efecto de las condiciones de secado osmótico, concentración del agente osmótico y temperatura, por medio de distintos análisis cinéticos para determinar las condiciones de trabajo en las cuales se obtiene una mejor deshidratación osmótica del fruto.

Analizar el efecto del secado convectivo por arrastre de aire sobre las de tiras de pulpa de aguacate previamente sometidas a deshidratación osmótica por medio del resultado de sus variables cinéticas y determinar a qué condiciones se obtiene un menor tiempo de secado.

Determinar si existe diferencia significativa entre los tratamientos de secado por medio de cambios en los parámetros de calidad junto con la evaluación sensorial del producto final deshidratado para establecer que tratamiento es la mejor alternativa de secado.

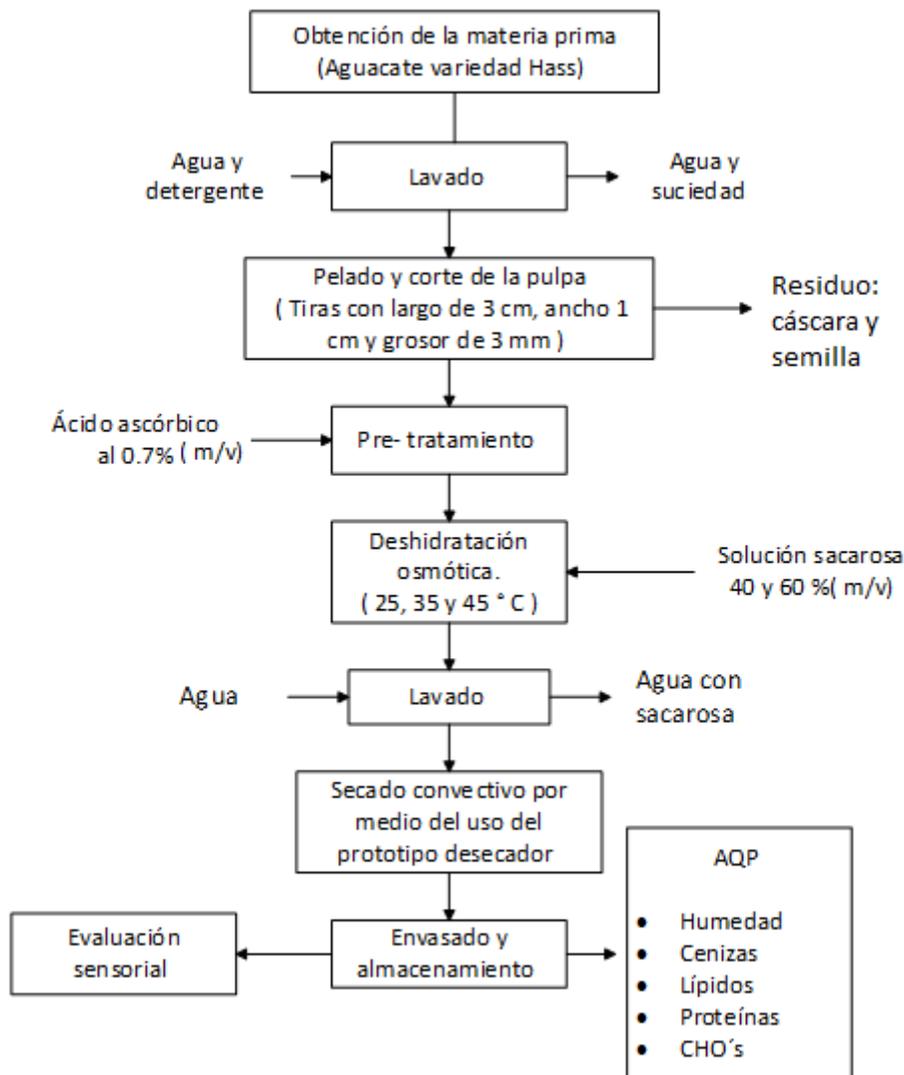
CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Cuadro metodológico

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama de proceso para obtener de las tiras de pulpa.

Figura 3.1 Diagrama general



3.2 Materiales y métodos

- Obtención de la materia prima

Se utilizaron aguacates (*Persea americana Mill.*) variedad Hass, obtenidos en el centro comercial Wal-Mart Copilco del Distrito Federal, provenientes del Estado de Michoacán.

Los frutos se seleccionaron con un grado de madurez tipo B (Tabla 1.3), pues el aguacate presenta una consistencia adecuada para soportar la manipulación así como los procesos de deshidratación y determinación de parámetros de calidad. Los frutos se seleccionaron con base en su color, consistencia firme, sin evidencia de daños mecánicos por insectos o enfermedades y con el mismo grado de desarrollo para no tener variables adicionales.

Las muestras fueron trasladadas al laboratorio de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, donde se procesaron el mismo día de su compra.

- Lavado y desinfección

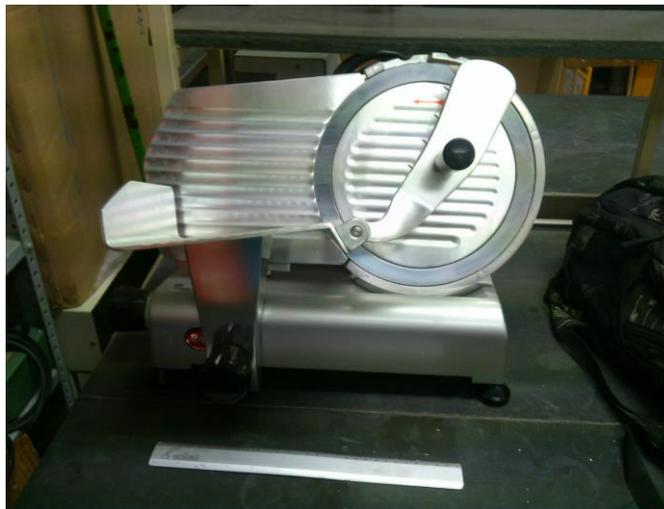
Los aguacates seleccionados se enjuagaron con agua potable, luego con el uso de un cepillo y detergente alcalino líquido, usado de acuerdo a la recomendación del fabricante (2 cucharadas por litro de agua), se disminuye la carga microbiana y suciedad. Se efectúa otro enjuague con agua potable para eliminar la suciedad y detergente en solución.

Al finalizar se sumergen los aguacates en una solución de hipoclorito de sodio marca Cloralex de 0.5 mL por litro de agua y se mantienen sumergidos durante 2 minutos.

- Pelado y corte de la pulpa

Se procedió a separar la pulpa de la cáscara manualmente y la pulpa fue cortada longitudinalmente por medio de una rebanadora (Figura 3.2) ajustando los cortes a 3 mm de espesor por rebanada de pulpa (medidos con un Vernier). Cada rebanada obtenida fue seccionada, manualmente con un cuchillo de acero en pequeños rectángulos de dimensiones 3.0 x 1.0 cm.

Figura 3.2 Rebanadora marca, Bermex 250-ST



- Pretratamiento

Las tiras de pulpa de aguacate se enjuagaron con ácido ascórbico al 0.7 % (m/v) durante 1 minuto y a temperatura ambiente, previo a la deshidratación osmótica, con el fin de evitar el oscurecimiento enzimático.

- Deshidratación osmótica o pretratamiento osmótico

Se utilizó sacarosa como agente osmótico a dos concentraciones distintas, 40 y 60 % (m/v). A estas soluciones se les adicionó benzoato de sodio al 0.05 % (m/v) para evitar el crecimiento de microorganismos y EDTA a 300 ppm para evitar el oscurecimiento enzimático; los aditivos que se seleccionaron para esta etapa así como la concentración de los mismos, se apoyó de los resultados presentados en

el trabajo realizado por Dorantes (1978) para la estabilización de pulpa de aguacate variedad Hass.

La cantidad en masa de solución osmótica fue en proporción de 6:1 con respecto a la muestra. Las muestras fueron preparadas de la manera descrita anteriormente, cada tira de pulpa fue pesada después de ser eliminado el exceso de enjuague de la etapa de pretratamiento, por medio del uso de papel absorbente, estas fueron depositadas dentro de su espacio asignado en la charola de acero, la cual ya contenía la solución osmótica. El área promedio ocupada por todas las tiras para los tratamientos, fue de 0.63 m² con un espesor promedio de 3.04 mm; se trabajó en todos los casos a temperatura constante, controlada por una incubadora (Figura 3.3).

Figura 3.3 Incubadora marca Cole Palmer.



Se realizó por triplicado cada tratamiento de deshidratación osmótica, primera fase de secado combinado de las tiras de pulpa de aguacate, con la solución de sacarosa a las temperaturas de 25, 35 y 45 °C (Tabla 3.1), se consideraron estas temperaturas de operación porque autores reportan que a temperaturas mayores se generan sabores indeseables en el producto final (Bennet et al., 1973, García et al., 1975).

Tabla 3.1 Condiciones para secado osmótico de tiras de pulpa de aguacate

Experimento	Temperatura (°C)	Concentración de solución osmótica (% m/v)
SO1	25	40
SO2	35	
SO3	45	
SO4	25	60
SO5	35	
SO6	45	

- Secado convectivo por arrastre de aire

Para el caso de secado por convección forzada, como segunda fase de secado combinado de las tiras de pulpa de aguacate variedad Hass. Este proceso de secado se realizó con el prototipo de equipo secador tipo túnel (Figura 3.4). El equipo se trabajó a temperatura de bulbo seco de 25 °C, medida con un termohigrómetro RTR 57U y a una velocidad de aire de 3.2 m/s medida con un anemómetro CEM 618.

Figura 3.4 Prototipo de equipo secador tipo túnel. (Desarrollado en la FES Zaragoza, campus 2., laboratorio ET-PA 24).



El procedimiento seguido, durante esta etapa de secado combinado, fue de la siguiente manera; Inmediatamente después de la deshidratación osmótica, las tiras de pulpa de aguacate, se enjuagaron con agua purificada comercial marca Epura, para eliminar el exceso de la solución de sacarosa que queda adherido en las tiras y por consiguiente se eliminó el exceso de agua de enjuague con papel absorbente. Esta operación dura aproximadamente 10 a 20 segundos, por ello la humedad que pudiera adquirir el producto es despreciable.

Las tiras de pulpa de aguacate se colocaron sobre cajas Petri de vidrio donde se ocupó un área de 0.08 m² de la superficie disponible de cada una de las cajas. Se registró la masa de cada caja con su respectivo contenido de tiras de pulpa de aguacate, antes del proceso de secado y se fue monitoreando la masa durante el transcurso del secado convectivo por cada 10 minutos durante la primera hora, a la segunda hora cada 15 minutos y de la segunda hora en adelante cada 30 minutos. Se registraron los cambios de masa como función del tiempo con ayuda

de una balanza analítica (marca Ohaus modelo PA214, con sensibilidad de 0.0001 g). Se debe mencionar que, las cajas Petri utilizadas permitieron tener un flux de secado sólo por la parte superior de la muestra.

En la Tabla 3.2. Se muestran las condiciones de trabajo para cada uno de los tratamientos de secado combinado.

Tabla 3.2 Condiciones para secado combinado de las tiras de pulpa de aguacate

Código de las muestras	Primera fase Secado osmótico		Segunda fase Secado por convección forzada	
	Temperatura (°C)	Concentración de solución osmótica (% m/v)	Temperatura bulbo seco (°C)	Velocidad del aire (m/s)
SC1	25	40	25	3.2
SC2	35			
SC3	45			
SC4	25	60		
SC5	35			
SC6	45			

3.3 Curvas de secado osmótico

Para determinar la pérdida de humedad (WL) y la ganancia de sólidos solubles (SG) de las muestras, con respecto al tiempo de secado, se empleó una balanza analítica (marca Ohaus modelo PA214, con sensibilidad de 0.0001 g) y una estufa marca Cole Parmer Figura 3.5. Se tomaron las muestras a diferentes tiempos de secado, hasta obtener la humedad de equilibrio para cada una de las condiciones trabajadas.

Para obtener el tiempo de secado osmótico para cada condición a la que se trabajó (Tabla 3.1), se procedió a realizar los procesos de secado durante 8 horas y monitorear la masa inicial y final de la muestra hasta que se alcanzara el punto de equilibrio. La humedad de equilibrio, se tomó como el promedio de aquellos puntos donde la humedad base húmeda se mantuvo constante, tanto para WL como para SG.

Las muestras obtenidas a los diferentes tiempos de secado se lavaron con agua destilada para eliminar el exceso de agente osmótico, se secaron con papel absorbente, se pesaron y se determinó su contenido de humedad por diferencia de masa, hasta llegar a peso constante en estufa a 100 °C.

Una vez obtenidas las masas correspondientes a cada tiempo de secado, se determinó el coeficiente difusivo de agua y sólidos para cada tratamiento realizado, y usando las ecuaciones 1.3 para determinar la pérdida de agua (WL), la 1.4 para la ganancia de sólidos solubles (SG) así como la 1.6 y 3.5 para el coeficiente de difusividad de agua (Dew) y sólidos (Des), respectivamente.

Los datos experimentales se obtuvieron monitoreando las masas iniciales y finales, con las técnicas ya mencionadas; durante la primera hora se determinó el contenido de humedad cada 10 minutos, para la segunda hora cada 15 minutos, para la tercera hora cada 20 minutos y de la cuarta hora en adelante, se tomó cada 30 minutos, para las diferentes corridas.

3.4 Coeficiente de difusividad de agua y sólidos.

Los coeficientes de difusión se obtuvieron de la solución analítica de la segunda ley de Fick, por medio de la solución propuesta por Crank, para la difusión unidireccional en estado transitorio, para la geometría de placa de longitud infinita (Barbosa, 2002).

La ecuación 1.6 se linealizó a la ecuación 3.1, para obtener el coeficiente de difusión a partir del valor de la pendiente como se muestra en la Figura 3.5:

$$\ln \frac{[H_2O]_t - [H_2O]_{eq}}{[H_2O]_o - [H_2O]_{eq}} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{D_{ew} * \pi^2 * t}{4l^2} \quad Ec. (3.1)$$

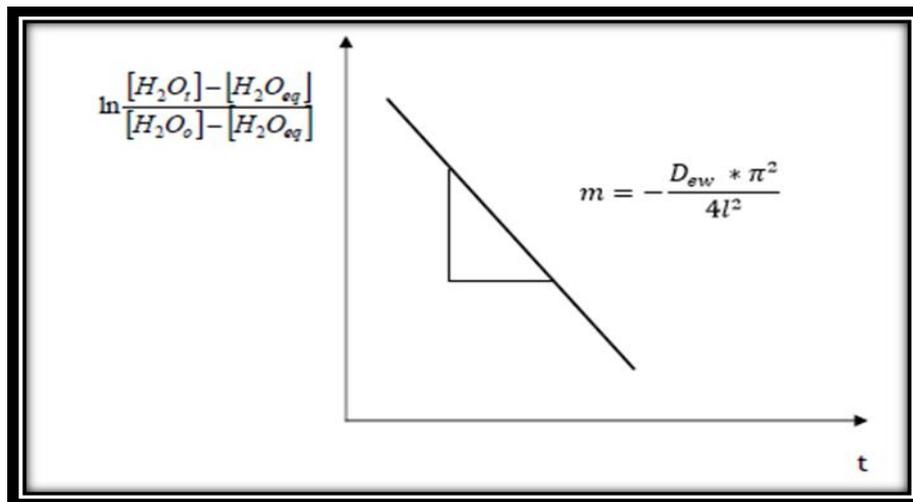
$$Y = mx + b$$

$$Y = \ln \frac{[H_2O]_t - [H_2O]_{eq}}{[H_2O]_o - [H_2O]_{eq}} \quad Ec. (3.2)$$

$$m = -\frac{D_{ew} * \pi^2}{4l^2} \quad Ec. (3.3)$$

$$b = \ln \frac{8}{\pi^2} \quad Ec. (3.4)$$

Figura 3.5. Obtención del coeficiente de difusividad (Dew).



El procedimiento para la obtención del coeficiente de difusividad efectiva de sólidos (Des) es el mismo que el usado para la obtención de (Dew) sólo que partimos de la ecuación 3.5

$$\frac{[S]_t - [S]_{eq}}{[S]_o - [S]_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-D_a (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t \right] \quad Ec. (3.5)$$

Donde:

[S] = Contenido de sólidos en el producto.

3.5 Elaboración de las curvas de secado por convección forzada

Las curvas para el flux de velocidad de secado se realizaron usando el siguiente procedimiento. Primero se calculó el valor de humedad base seca al tiempo t por medio de la ecuación 3.6 y usando los datos obtenidos experimentalmente de tiempo y masa del alimento durante el procedimiento de secado convectivo.

$$X_t = \left(\frac{W - W_s}{W_s} \right) * 100 \quad \text{Ec. (3.6)}$$

Donde:

X_t = Humedad base seca al tiempo t (k de agua/ k de sólido seco),

W = Masa del sólido húmedo para cada tiempo (k totales de agua),

W_s = Masa del sólido seco (k de sólido seco).

W_s se obtuvo después de finalizar el tratamiento de secado convectivo, midiendo la masa del sólido seco por medio de una balanza analítica y someter la muestra a un secado con una estufa a 100 °C durante 2 horas.

A continuación de haber establecido las condiciones de secado y el contenido de humedad en equilibrio, se procedió a calcular el contenido de humedad libre X, para cada valor de X_t con ayuda de la ecuación 1.7. Se realizó una gráfica de humedad libre X (k de agua libre / k de sólido seco) vs tiempo t (h) con los valores obtenidos.

La velocidad de secado se determinó a partir de la gráfica humedad libre X en función del tiempo, midiendo las pendientes de las tangentes a la curva, con lo cual se obtuvieron valores de dX/dt para los valores de t y por medio de la ecuación 1.8, se calculó la velocidad o flux de velocidad de secado (R) para cada punto.

- Almacenamiento

Las tiras de pulpa de aguacate ya deshidratadas Se almacenaron en un lugar fresco con ausencia de luz hasta que fueron usadas para los análisis de evaluación de calidad.

3.6 Análisis químico proximal

3.6.1 Contenido de humedad

Para la determinación del contenido de humedad se utilizó el método por estufa (Figura 3.6). El método está basado en la diferencia de pesos que existe entre el material al inicio de la prueba y el peso del mismo material al final de la prueba.

Figura 3.6 estufa marca Cole Palmer.



La preparación de la muestra fue de la siguiente manera

Procedimiento:

Se pesó una masa de 2 a 3 g de muestra en un crisol (previamente pesado después de tenerlo a peso constante 2 h a 130 °C). Se secó la muestra en la estufa durante 2 h a 100 –110 °C. Se retiró de la estufa y se dejó enfriar en el

deseCADador y se pesó tan pronto como se equilibró con la temperatura ambiente. Se repitió hasta obtener peso constante (Nielsen 2003).

El resultado se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$[H_2O] = \frac{(W_i - W_f)}{W_i} * 100 \quad Ec. (3.7)$$

[H₂O] = Contenido de humedad base húmeda.

W_i = Masa inicial del alimento en gramos.

W_f = Masa final del alimento en gramos.

3.6.2 Contenido de cenizas

Se determinaron por calcinación en una mufla a 550 °C según la NMX-F-066-S-1978 (Figura 3.7). Se puso a peso constante un crisol 2 horas aproximadamente en la mufla a 600 °C. Se pesó una masa de 3 a 5 gramos de muestra en el crisol sin que la muestra sobrepasara la mitad del crisol previamente pesado. Se calcinó la muestra, primero con una parrilla en la campana hasta que no hubo desprendimiento de humos y posteriormente se metió en la mufla 2 horas cuidando de que la temperatura no fuese mayor de 550 °C. Se repitió la operación anterior hasta conseguir unas cenizas blancas o ligeramente grises, homogéneas. Se enfrió en desecador y se pesó (Kirk et al, 1996). Se calculó el contenido de cenizas y se expresó en porcentaje (Ecuación 3.8).

Figura 3.7 Mufla marca Vulcan



$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(P - p)}{M} * 100 \quad \text{Ec. (3.8)}$$

P=Masa del crisol con las cenizas en gramos.

p= Masa de crisol vacío en gramos.

M= Masa de la muestra en gramos

3.6.3 Contenido de proteína

Se determinó por medio del procedimiento micro Kjeldahl (Figura 3.8), con el cual se mide la cantidad de nitrógeno total en la muestra, el método se basa en la descomposición de la materia orgánica con ácido sulfúrico concentrado bajo calentamiento, formándose sulfato de amonio que en exceso de hidróxido de sodio libera amoníaco, el que se destila recibiendo en:

a) Ácido clorhídrico, donde se forma cloruro de amonio NH_4Cl y el exceso de ácido es valorado con hidróxido de sodio en presencia de rojo de metilo, o

b) Ácido bórico con indicador, formándose borato de amonio el que se valora con ácido clorhídrico.

Se titula el exceso de ácido (en el caso de recibir el destilado en HCl 0.1N) con una solución de NaOH 0.1 N. En el caso de recibir con ácido bórico, con una solución de HCl 0.1N. Se calculó la cantidad de proteína como porcentaje considerando las reacciones que se llevan a cabo.

Figura 3.8. Equipo micro Kjeldahl.



3.6.4. Contenido de hidratos de carbono reductores totales

Se determinaron por medio del método antrona-sulfúrico (Nielsen 2003); es un método espectrofotométrico. Se fundamenta en que los hidratos de carbono en medios fuertemente ácidos y altas temperaturas, sufren deshidrataciones simples y producen varios derivados del furano que se condensan con el fenol o la antrona, que son aminas aromáticas, dando origen a compuestos coloridos. La intensidad del color desarrollado durante la condensación va a estar en función de los hidratos de carbono presentes en la muestra; Todos los azúcares, como

oligosacáridos y polisacáridos, pueden ser determinados, recordando que estos bajo hidrolisis ácida producen monosacáridos.

La forma en que procede la reacción no es estequiométrica, y depende de la estructura del azúcar; por lo tanto, se realiza una curva patrón con una solución patrón de glucosa de 100 mg/mL y una solución de antrona al 0.2 % en ácido sulfúrico concentrado, leyendo a 640 nm.

Se preparó una solución de la muestra en agua destilada, procurando que esta se encontrará en un intervalo de sensibilidad del método de (10-100 mg/mL) y se realizó esta determinación por triplicado.

3.6.5. Contenido de lípidos

Se determinaron por el método de Goldfisch el cual consistió en realizar una extracción continua con un disolvente orgánico; el cual se calentó y volatilizo para posteriormente condensarse sobre la muestra. El disolvente goteaba continuamente a través de la muestra con el objetivo de extraer la grasa. El contenido de grasa se cuantifica por diferencia entre la muestra o la grasa removida (Nielsen, 2003).

Se colocaron los vasos para Goldfisch en la estufa a 100 °C, hasta tenerlos a peso constante, aproximadamente 2 horas. Se pesó de 4 a 5 gramos de muestra sobre un papel filtro de celulosa, se enrolló y selló con un algodón. Se situó el rollo en un tubo de vidrio con terminación en pico y el fondo perforado; el cual se colocó en el sostenedor del equipo.

Se adicionó en el vaso para Goldfisch aproximadamente 40 mL de éter etílico y se colocó en el quipo mediante un anillo de hierro. Se subió la parrilla hasta llegar al

vaso para Goldfisch montado y se calentó hasta obtener la extracción completa de la grasa, verificando su extracción por medio del goteo de la de la descarga sobre un papel filtro, para notar cuando el disolvente dejara de contener residuos de grasa. Se quitó el vaso del equipo y se dejó secar el extracto en una estufa a 60-62 °C por dos horas hasta obtener peso constante. Posteriormente se coloca en el desecador hasta que se enfría a temperatura ambiente. Se pesa el vaso y se determina la cantidad de grasa extraída.

Figura 3.9. Equipo extracción de grasas Goldfisch



3.6.5.1 Análisis de identidad de los aceites obtenidos:

A los aceites obtenidos de las muestras, después de los procesos de secado combinado, se les realizó un análisis de identidad con el fin de determinar su calidad. Se evaluó el índice de yodo de acuerdo a la técnica que se detalla a continuación.

a) Índice de yodo

El método de Hanus fue utilizado para determinar el índice de yodo, el cual es la medida de instauración de las grasas y aceites, y se expresa en gramos de yodo absorbido por gramo de muestra. Este método se basa en la reacción de

monobromuro de yodo en exceso. La cantidad de monobromuro de yodo que no se adicionó a los dobles enlaces, oxida una solución de yoduro a yodo, y este se determina por una valoración con una solución de tiosulfato de sodio. Las reacciones de adición se llevaron a cabo en la oscuridad para evitar que se produjeran reacciones laterales de radicales inducidos por la luz y con esto un gasto aparente del halógeno mayor.

Dado que el reactivo halogenante va preparado en ácido acético glacial y es de concentración aproximada y variable, deberá hacerse siempre un ensayo en blanco para calcular su equivalente en yodo (Nielsen, 2003).

Se pesaron de 0.1 a 0.5 gramos de muestra en los matraces para yodo a los cuales se les adicionó 10 mL de diclorometano para disolver la grasa. Se le adicionó 25 mL de reactivo de Hanus en cada matraz y se dejó reposar 30 minutos en la oscuridad, agitando ocasionalmente. Al finalizar el periodo de reposo, se adicionó 10 mL de KI al 15 %, agitando vigorosamente, se adicionaron después 100 mL de agua destilada.

Se tituló el yodo con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio al 0.1 N adicionando gradualmente y con agitación vigorosa hasta que el color amarillo desapareciera. Se adicionó 1 mL de solución indicadora de almidón al 1 % y se continuó agitando hasta que el color azul desapareció. Se registró el volumen gastado. Los resultados se expresan en gramos I₂ absorbido por 100 gramos de aceite.

El índice de yodo se calculó con la siguiente ecuación:

$$IY = \frac{(A - B) * N * 12.69}{M} \quad Ec. (3.9)$$

A= Volumen de tiosulfato gastados por el blanco, mL

B= Volumen de tiosulfato gastados por la muestra, mL

N= Concentración de tiosulfato,

M= Masa de la muestra, g

12.69=Este factor es obtenido considerando que la reacción con I₂ es tipo redox, donde se presenta un cambio de 2 electrones. PM I₂ = 254 g/mol

$(254\text{g/mol}) \cdot (1\text{mol}/2\text{eq}) \cdot (\text{eq}/10^3\text{meq}) \cdot (100\text{ gramos de muestra}) = 12.69 ((\text{g I}_2/\text{meq}) \cdot \text{g de muestra}) = 12.69$

3.6.2 Análisis de calidad de los aceites obtenidos

El análisis de calidad concierne al grado de deterioro del aceite debido al manejo de las muestras durante la extracción. El parámetro que se evaluó fue índice de peróxido de acuerdo a la técnica descrita a continuación.

a) Índice de peróxidos

El valor o índice de peróxido indica los miliequivalentes de peróxidos por 1000 gramos de muestra. Es una determinación volumétrica de todas las sustancias, en términos de peróxidos, existentes en la solución de la muestra.

Se pesaron 5 gramos aproximadamente de aceite o grasa en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se adicionaron 25 mL de una solución ácido acético-diclorometano (3:2), disolviendo perfectamente. Posteriormente se adicionaron 0.5 mL de una solución saturada de yoduro de potasio y se dejó reposar en la oscuridad por 60 segundos; finalizado este periodo de tiempo se añadió 75 mL de agua destilada y se tituló lentamente con tiosulfato de sodio 0.01 N, agitando vigorosamente durante la titulación hasta obtener un color amarillo pálido. Posteriormente se adicionaron 0.5 mL de una solución de almidón indicadora al 1 % y se continuo la titulación hasta que desapareció el color azul por más de 30

segundos. Se realizó una determinación en blanco de los reactivos; se manejó por triplicado el análisis de índice de peróxido y se promedió dicha determinación.

El índice de peróxidos se obtiene calculando los miliequivalentes de tiosulfato de sodio utilizados en la titulación por kg de muestra.

El índice de peróxidos se calculó se la siguiente manera:

$$IP = \frac{S * N}{M} \quad Ec. (3.10)$$

IP= Índice de peróxido meq peróxido/ k aceite

S= Volumen de la solución de tiosulfato de sodio con la correlación de blanco (mL).

N= Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

M= Masa de la muestra (k)

3.7 Evaluación sensorial

Para las pruebas sensoriales, se elaboraron suficientes muestras deshidratadas de pulpa de aguacate variedad Hass, las muestras se presentaron sobre un plato desechable de unicel y se ofreció agua durante la prueba.

Se realizaron pruebas de nivel de agrado con consumidores donde se aplicó un cuestionario (Anexo A) a 54 personas. Las pruebas se realizaron un día domingo a las afueras de la capilla de dicha unidad a las 11:00 AM aprovechando que las personas estaban saliendo de los servicios religiosos, ya que se podía contar con consumidores de un amplio intervalo de edades, desde 21 hasta 64 años.

Todos análisis estadísticos de los resultados obtenidos y que son presentados en el Anexo A y B, se desarrollaron gracias al software Minitab 16^{MR}.

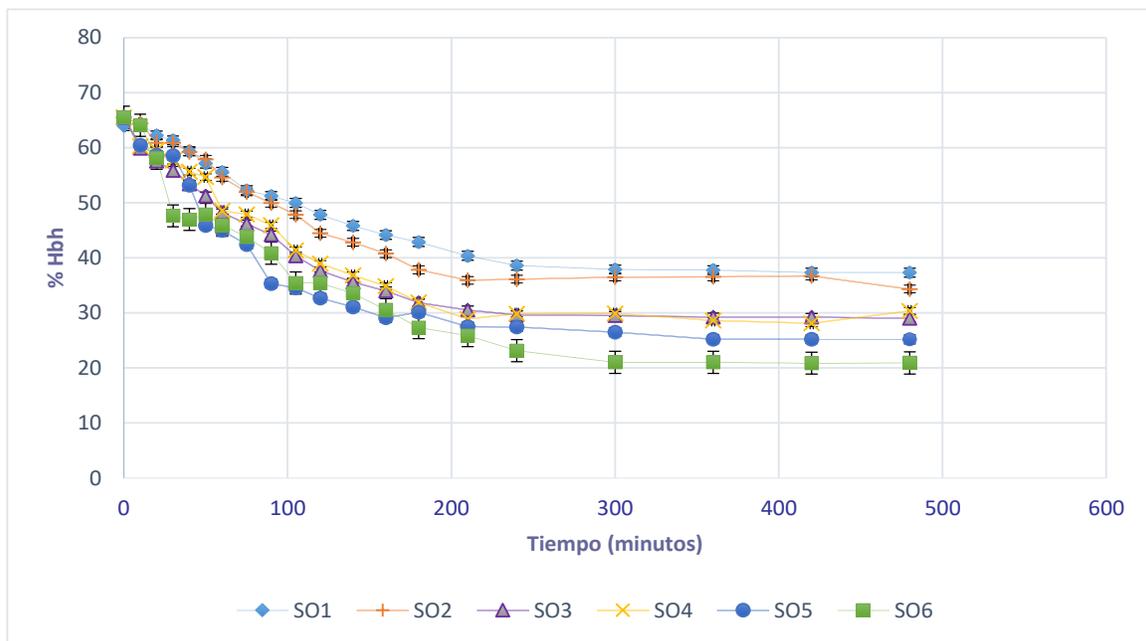
CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.1 Cinética del secado osmótico

En las curvas de porcentaje de humedad base húmeda con respecto al tiempo (Figura 4.1), se observó que tanto la temperatura como la concentración tienen un efecto importante sobre la deshidratación de las tiras de pulpa de aguacate, ya que al incrementarse la temperatura y/o la concentración del agente osmótico se alcanzan valores finales de humedad cada vez menores. Las altas temperaturas y concentraciones del agente osmótico promueven la rápida pérdida de agua en el aguacate, principalmente por difusión y flujo capilar, mientras que la impregnación del alimento con los sólidos solubles de la solución osmótica y la lixiviación de los componentes del alimento se producen solamente por difusión.

Figura 4.1 Variación del porcentaje de humedad base húmeda en función del tiempo, durante la deshidratación osmótica de las tiras de pulpa de aguacate con una solución de sacarosa



Al emplear cualquiera de las concentraciones del agente osmótico, se observan dos etapas; la primera es la etapa dinámica que se presenta durante las cuatro primeras horas del proceso, donde la variación de humedad disminuye hasta que se alcanza la segunda etapa, el equilibrio, donde el proceso osmótico termina pues se alcanza el equilibrio, es decir, cuando la velocidad de transporte de materia disminuye o se anula, como se observa en la comparación de curvas de humedad base húmeda en función del tiempo de la Figura 4.1. Esta rápida pérdida de agua al inicio es debido a la gran fuerza impulsora que existe entre el agua del fruto y el agente osmótico de lo rodea (Lazarides et al., 1995).

Las Figuras 4.2 y 4.3 muestran las curvas que describen el comportamiento de la pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) respectivamente. Estas variables fueron obtenidas experimentalmente aplicando las ecuaciones 1.3 y 1.4 del modelo de usado por Azuara et al. (1992) explicado en los Capítulos 1 y 3, a través del monitoreo de las masas de las muestra al inicio y durante las 8 horas que duro todo el proceso.

Figura 4.2 Cinética de pérdida de agua (WL) de tiras de pulpa de aguacate para todos los tratamientos osmóticos realizados.

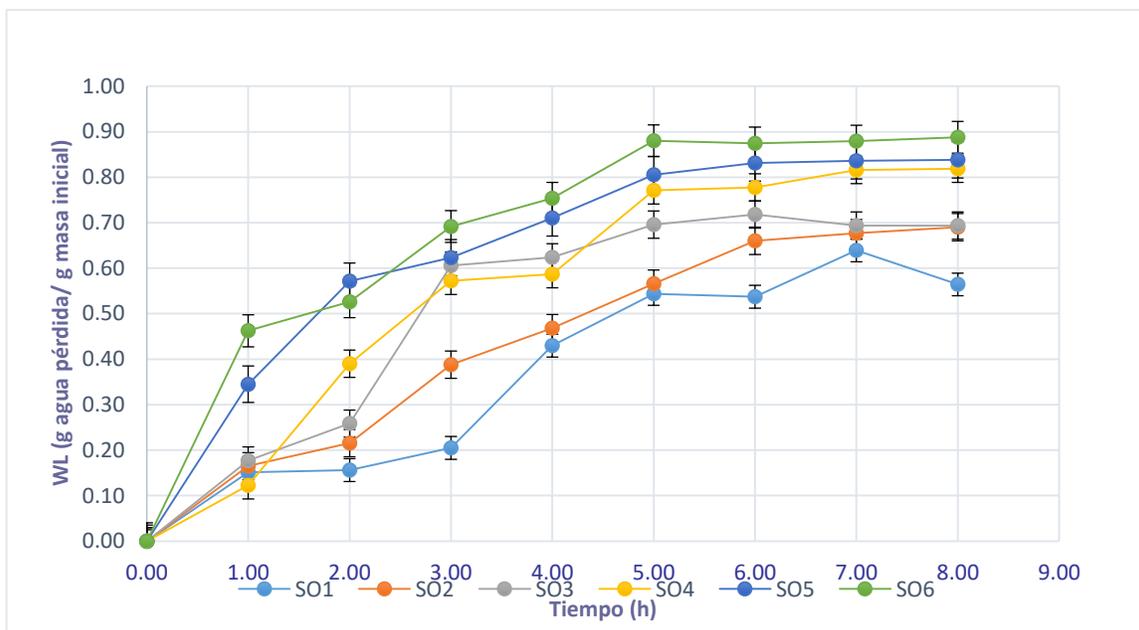
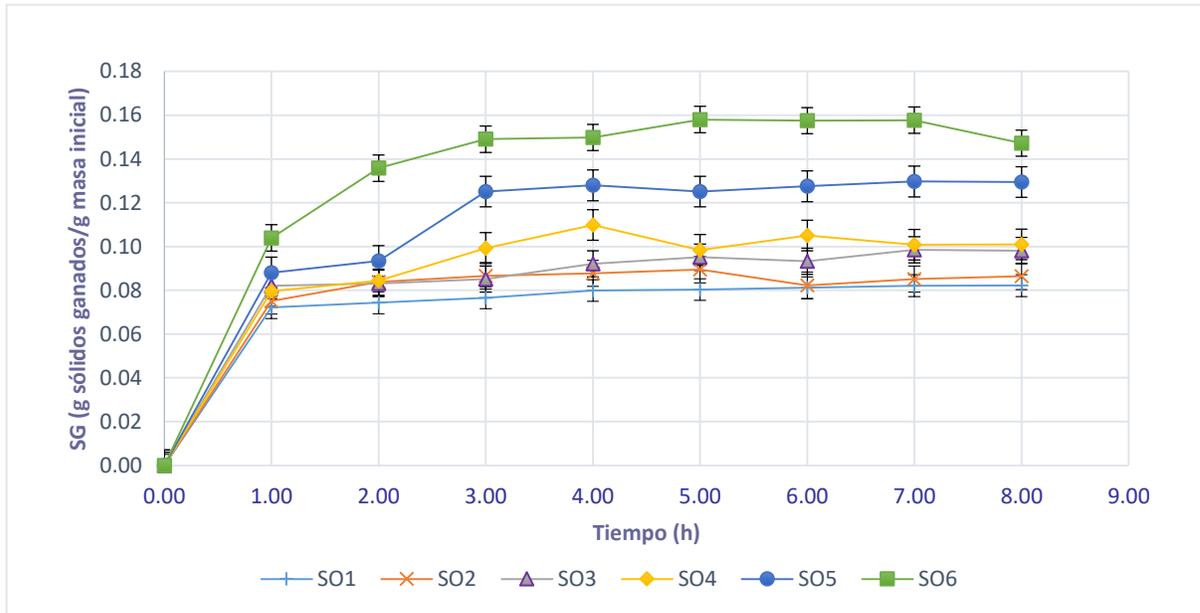
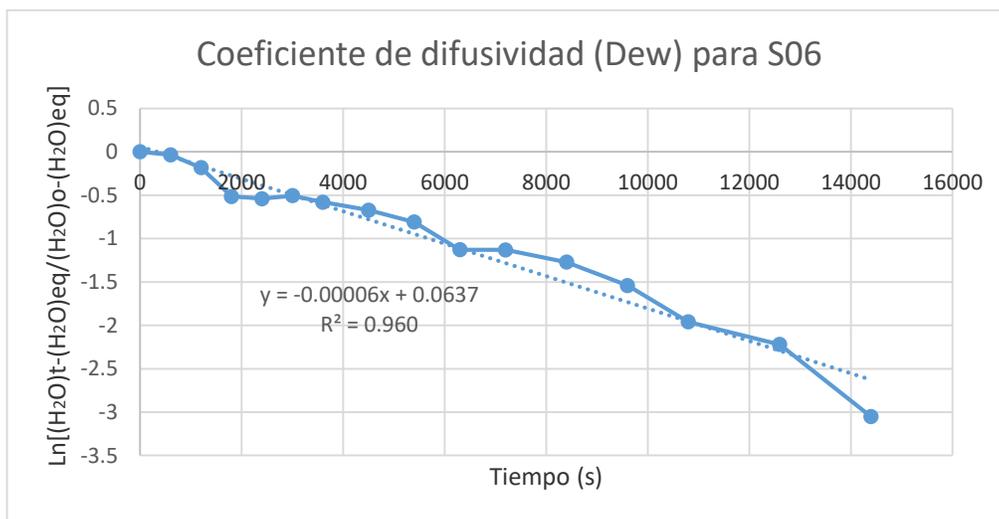


Figura 4.3 Cinética de ganancia de sólidos (SG) de tiras de pulpa de aguacate para todos los tratamientos realizados.



Posteriormente, a partir de estos datos experimentales se estimó el coeficiente de difusividad de agua (D_{ew}) y sólidos (D_{es}), a partir de la pendiente como se muestra en la Figura 4.4 y mediante las ecuaciones 1.6, 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 descritas también en los Capítulos 1 y 3.

Figura 4.4 Obtención del coeficiente de difusividad (D_{ew}) para SO6.



A continuación se presentan los datos de D_{ew} y D_{es} .

Tabla 4.1 Coeficientes de difusividad de agua y sólidos, obtenidos del secado osmótico efectuado a las tiras de pulpa de aguacate

Concentración del agente osmótico % m/v	Temperatura	D_{ew} m ² /s	R^2 para D_{ew} m ² /s	D_{es} m ² /s	R^2 para D_{es} m ² /s
40	25 °C	8.8280×10^{-11}	0.9544	6.0034×10^{-12}	0.9122
	35 °C	1.9696×10^{-10}	0.9451	7.2252×10^{-12}	0.9014
	45 °C	3.5441×10^{-10}	0.9232	7.4476×10^{-12}	0.8932
60	25 °C	9.1976×10^{-11}	0.9444	4.3467×10^{-11}	0.9007
	35 °C	2.1061×10^{-10}	0.9562	5.5624×10^{-11}	0.9320
	45 °C	2.2202×10^{-10}	0.9606	6.6131×10^{-11}	0.9500

4.1.2 Discusión de los resultados del secado osmótico

a) Pérdida de agua (WL)

En la Figura 4.1 se presentan las curvas de porcentaje de humedad base húmeda en función del tiempo, en la cual observamos que en todos los tratamientos estudiados el contenido de humedad disminuye conforme transcurre el tiempo del proceso. Para analizar los datos obtenidos, se realizó una prueba ANOVA de dos factores (Anexo B), donde se observa que existe diferencia significativa entre los resultados de porcentaje de humedad a distintas temperaturas y a distintas concentraciones. Para aclarar el panorama se realizó una prueba de comparación múltiple usando el método de Tukey a un nivel de confianza del 95 %, con el fin de saber cuál o cuáles de los tratamientos mostraba diferencia y cuáles no, y de esta manera se supo que SO1 y SO6 fueron los tratamientos que mostraron ser diferentes a los demás; ya que SO1 fue el que menos humedad perdió, mientras que SO6 por el contrario fue el que mayor humedad perdió.

En la Figura 4.2 se puede observar más claramente la pérdida de agua en función del tiempo, en donde se pudo notar cómo los tratamientos que se sometieron a mayor concentración de agente osmótico (60 % m/v) resultaron ser aquellos donde se encontró mayor efectividad en cuanto a WL, que los que usaron una

concentración de agente osmótico al 40 % (m/v). También se puede deducir que la mayor WL se produce durante las primeras seis horas de la deshidratación osmótica para todas las concentraciones de sacarosa trabajadas. Con respecto a la influencia de la temperatura, se observa cómo a medida que se incrementa la temperatura en los tratamientos que mantienen la concentración osmótica constante, la pérdida de agua aumenta. El análisis en conjunto de ambas condiciones, temperatura y concentración, señala que el tratamiento SO6 resultó ser el más efectivo ya que durante las primeras 5 horas del proceso se había producido la mayor deshidratación del fruto, siendo este el tiempo del periodo dinámico y el de mayor transferencia de agua desde el fruto hacia la solución osmótica, después del cual no hubo mucha variación pues se había llegado al equilibrio.

El tratamiento SO6 logró hacer la mayor extracción de agua del fruto, esto coincide con los resultados de la prueba de comparación múltiple de Tukey a los datos de WL (Anexo B), donde el tratamiento SO6, mostró ser significativamente diferente, aunque también lo fueron los tratamientos SO1 y SO2 estos dos tratamientos fueron diferentes a los otros debido a que fueron los que menos agua perdieron.

b) Ganancia de sólidos (SG)

En el caso de la SG, la ganancia se puede describir como un aumento constante y muy ligero; aunque cabe mencionar que los valores de la ganancia de sólidos durante las 8 horas de proceso no variaron mucho para cada uno de los seis tratamientos y esto coincide con los resultados del análisis estadístico de la prueba de comparación múltiple de Tukey a los datos de SG, donde en casi todos los tratamientos no hubo diferencia significativa a excepción de los tratamientos SO4 y SO1 los cuales tienen en común el uso de la temperatura más baja de proceso (25 °C).

Se observó cómo para los tratamientos en donde se usó una mayor concentración del agente osmótico (60 % m/v), la cantidad de SG es mayor y va aumentando hasta alcanzar su máximo en la cuarta hora de proceso, donde la ganancia de sólidos empieza a ser constante hasta el final del proceso. Por otra parte los tratamientos que se trabajaron con 40 % (m/v) de sacarosa, la SG es ligeramente menor que en los tratamientos con un 60 % (m/v).

Al analizar el efecto de la temperatura durante la ganancia sólidos, observamos cómo al aumentar la temperatura existe un aumento de SG, este resultado es el esperado, pues las temperaturas altas pueden producir cambios en la permeabilidad de la pared celular, ocasionando modificaciones en su selectividad, aunque puede influir en la fluidez (viscosidad) de la solución osmótica. Un incremento en la temperatura favorece la difusión ya que el coeficiente de difusividad, para una concentración de la solución osmótica constante, tiene una dependencia con la temperatura tipo Arrhenius (Rastogi y Raghavarao, 2004). Es decir, al aumentar la temperatura se incrementa la SG y esto coincide con los resultados del análisis estadístico de la prueba de comparación múltiple de Tukey donde los únicos tratamientos donde hubo diferencia significativa fueron los tratamiento SO4 y SO1 los cuales tienen en común la temperatura más baja de todos los procesos (25 °C).

Comparando la WL y la SG para ambas concentraciones del agente osmótico y temperaturas de proceso; donde en las Figuras 4.2 y 4.3 podemos notar cómo la ganancia de sólidos es menor que la cantidad de agua pérdida. Los resultados de los experimentos de Pointing et al. (1996) son similares y ellos dicen que al utilizar soluciones de NaCl ó sacarosa durante la deshidratación de frutas como manzanas y plátano, se presenta una mayor WL y menor SG debido a que los solutos penetran el tejido de la fruta en forma menos considerable, aumentando ligeramente la ganancia de sólidos con el paso de tiempo de proceso.

El comportamiento puede ser explicado si se considera que la permeabilidad de la membrana puede ser reducida por fenómenos de bloqueo o taponamiento, debido a que una alta concentración de sólidos, forma una capa de sólidos en la superficie del alimento. Estos fenómenos reducen el ingreso de solutos del exterior al interior (impregnación), pero no la salida de agua. Este fenómeno está relacionado con la diferencia de tamaño molecular y la selectividad de la membrana o pared celular que permite pasar a algunas moléculas y a otras no.

Dada la información anterior y debido a que se trabajó durante este experimento con concentraciones de la solución osmótica muy elevadas (40 y 60 % m/v), y a su vez se trabajó con sacarosa que es un disacárido que tiene un alto peso molecular (342 g/mol), entonces se puede explicar su baja penetración a causa de que este agente osmótico fue acumulándose en la superficie. Esta capa posiblemente fue eliminada durante el enjuague de exceso del agente osmótico y el posterior secado con papel absorbente.

c) Difusión para el proceso de deshidratación osmótica

El proceso de deshidratación osmótica, al ser controlado por la difusividad efectiva del líquido como de los sólidos, puede ser analizado como un proceso de secado convencional controlado, utilizándose el modelo difusional de Fick. Este método tradicionalmente ha sido utilizado en el estudio de la transferencia de masa en estado no estacionario para el secado de diversos alimentos, si se consideran como sólidos húmedos (Markowski, 1997). Para el caso de la pulpa de aguacate se utilizó la ecuación integrada de la segunda ley de Fick para tiempos largos y geometría de placa plana infinita en una dimensión, sin considerar el encogimiento de la muestra y ausencia de cualquier resistencia al transporte de masa (Crank, 1975).

Los resultados de coeficientes de difusividad efectiva de agua Dew (Ver Tabla 4.1), reflejan el desempeño global de la difusión de agua dentro del fruto, los datos

durante la deshidratación osmótica mostraron la tendencia esperada, respecto a la influencia de la temperatura cuando la concentración es constante ya que la Dew crece conforme aumenta la temperatura, pues la difusión es un fenómeno dependiente de la temperatura por ello a mayores temperaturas de proceso se promueve una mayor pérdida de agua debido a una mayor plasticidad de las membranas celulares (Lazarides et al., 1995).

Con respecto a la relación o dependencia con la concentración para una temperatura constante, los resultados mostraron que los coeficientes de difusión Dew aumentaban conforme la concentración lo hacía, aunque no se mostraron grandes diferencias en el análisis de varianza pues la F_{exp} resultó ser mayor que la F_{tab} y los resultados de comparación múltiple de medias indicaron que el tratamiento SO5 y SO6 fueron los que presentaron diferencias significativas en comparación a los otros tratamientos. Los valores reportados entran en el orden de magnitud reportado en la literatura para la difusión (Rastogui, 2002).

De estos resultados es importante que mencionemos las excepciones pues aunque en la prueba de comparación múltiple de medias el tratamiento SO6 mostró diferencia significativa, su Dew no manifestó la tendencia deseada, pues se esperaba que su coeficiente de difusión se encontrara dentro de los más altos de los seis tratamientos, pues éste correspondía a la temperatura y concentración más alta; a su vez este tratamiento alcanzo el contenido de humedad más bajo, pero los resultados no confirmaron lo anterior. El tratamiento SO6 no siguió la tendencia deseada respecto a la influencia de la concentración cuando la temperatura es constante ya que su valor de difusividad fue menor al valor del tratamiento SO3 con el que comparte la misma temperatura de proceso. Este resultado de Dew en el tratamiento SO6 se pueden explicar usando los planteamientos sobre la difusión de materia en alimentos sólidos recopilados por Schwartzberg y Chao (1982), que se resumen en lo siguiente:

- La estructura sometida a una deshidratación osmótica adsorbe los solutos o forma complejos con ellos o enlaza iones de la solución, lo que disminuye la difusividad.
- Al aumentar la concentración de sólidos solubles en el tejido, debiera aumentar la viscosidad y disminuir la difusividad. Con el incremento en la concentración de la solución se forma una capa de soluto sobre la superficie del producto que actúa como barrera reduciendo la pérdida de nutrientes y, a muy altas concentraciones, pueden dificultar también la pérdida de agua (Saurel et al., 1994).
- La difusividad puede disminuir debido a que la estructura sólida se deforma y se encoge. Según Schwartzberg y Chao (1982), la velocidad de difusión depende de la concentración y el tamaño de partículas que componen el agente osmótico.

Por otra parte, en los resultados de coeficientes de difusión efectiva de sólidos (D_{es}) se puede observar cómo existe una importante dependencia con respecto a la concentración, pues el coeficiente de difusión aumenta conforme la concentración lo hace y aunque también existe una dependencia con respecto a la temperatura, esta lo hacía de manera más leve y se demostró por medio de un análisis de varianza que no existía diferencia significativa entre los tratamientos y los resultados de comparación múltiple de medias indicaron que los tratamientos SO5 y SO6 fueron los únicos que presentaron diferencias significativas en comparación a los otros tratamientos.

Los coeficientes de difusividad obtenidos para la deshidratación osmótica a partir de la solución de Crank a la segunda ley de Fick, para la geometría de placa plana de longitud infinita, mostraron que este modelo describe adecuadamente la cinética de pérdida de agua, al obtenerse valores de coeficientes de correlación para D_{ew} que varían de 0.9232 hasta 0.9606, mientras que para D_{es} se

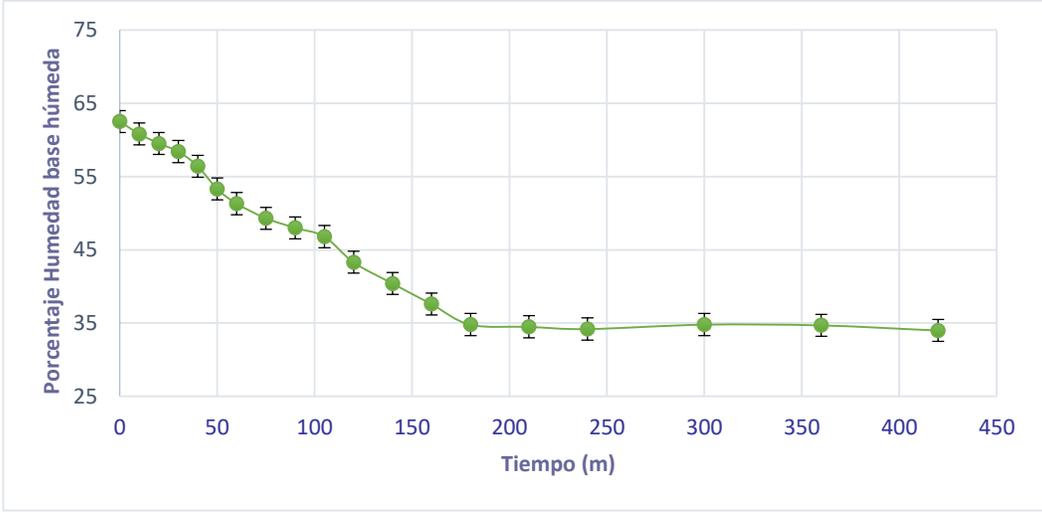
obtuvieron coeficientes de correlación para Des que varían de 0.9500 hasta 0.8932.

4.2.1 Cinética de secado convectivo por arrastre de aire

Para obtener las curvas de secado por arrastre de aire y efectuar su posterior análisis se consideraron las condiciones constantes con las que el equipo prototipo de secado permitió trabajar como fueron: la temperatura de bulbo seco (25 °C), velocidad de aire de secado (3.2 m/s), espesor de la muestra (3 mm) y flujo unidireccional del aire. Por otro lado, también se consideró constante al área de secado (0.08 m²), la cual es sólo el área ocupada por las muestras dentro de la superficie de la caja Petri y únicamente se considera que el flujo del aire ocurre por la cara superior. Fue necesario considerar estas condiciones para la parte experimental y de esta forma evaluar el efecto del tiempo de proceso de secado y cómo influiría el pretratamiento osmótico sobre el secado de las tiras de pulpa de aguacate durante la segunda etapa de secado combinado.

Para poder obtener el tiempo de secado de las muestras, previamente sometidas a una deshidratación osmótica. Se realizó inicialmente un secado convectivo por arrastre de aire, manteniendo las condiciones de temperatura de bulbo seco a 25 °C y trabajando con una temperatura ambiente promedio de 21.4 °C durante 8 horas a muestras sin pretratamiento alguno, cuyo grupo será considerado como grupo control; determinando la pérdida de peso con respecto al tiempo, de esta manera se determinó a los 210 minutos el punto de humedad de equilibrio, tomándose un promedio de las últimas lecturas (Figura 4.5), tiempo que ayudó a tener un estimado de la duración de los secados convectivos para las muestras sometidas a pretratamiento osmótico .

Figura 4.5 Curva experimental de secado convectivo por arrastre de aire, humedad base húmeda en función del tiempo de las tiras de pulpa de aguacate variedad Hass sin deshidratación osmótica.



Los resultados experimentales del secado convectivo se trabajaron como contenido de humedad libre (X) en función del tiempo, para las muestras sin tratamiento osmótico, se encuentran expresados gráficamente en la Figura 4.6, mientras que en la Figura 4.7 se muestra el mismo tipo de grafica pero para los resultados de las muestras con pretratamiento osmótico.

Figura 4.6 Curvas experimentales de humedad libre en función del tiempo de las tiras de pulpa de aguacate variedad Hass sin deshidratación osmótica.

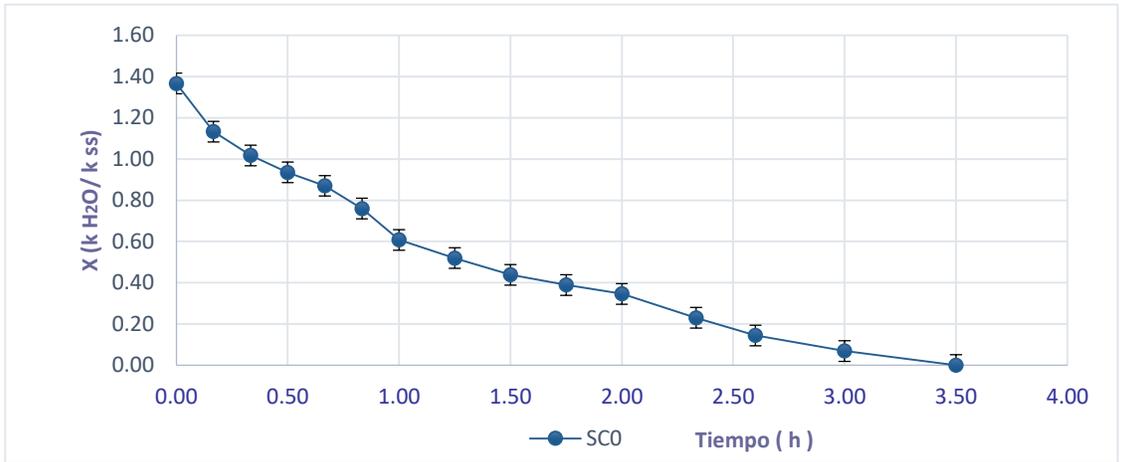


Figura 4.7 Curvas experimentales de humedad libre en función del tiempo de las muestras de pulpa de aguacate variedad Hass con pretratamiento osmótico.

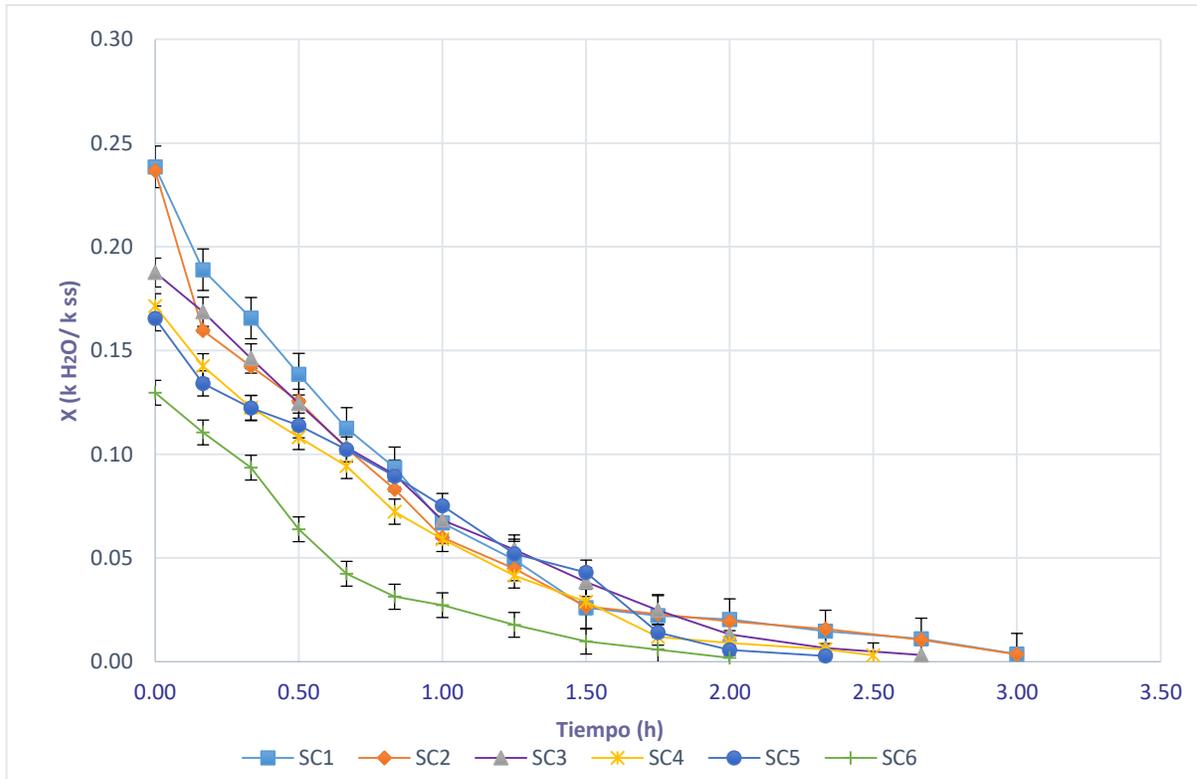


Figura 4.8 Curva de Flux de secado convectivo en función del tiempo para las muestras de pulpa de aguacate variedad Hass sin deshidratación osmótica.

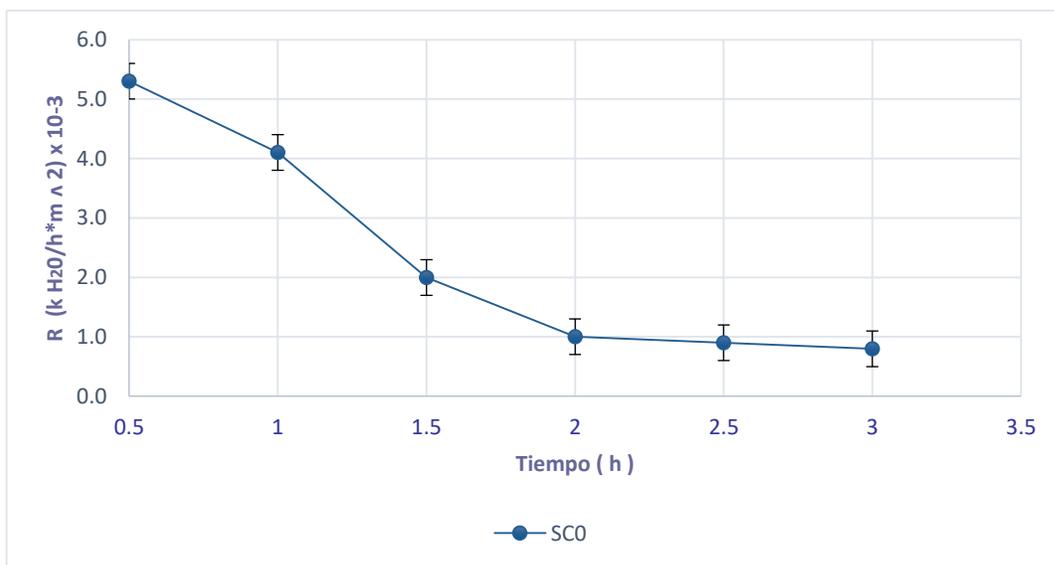
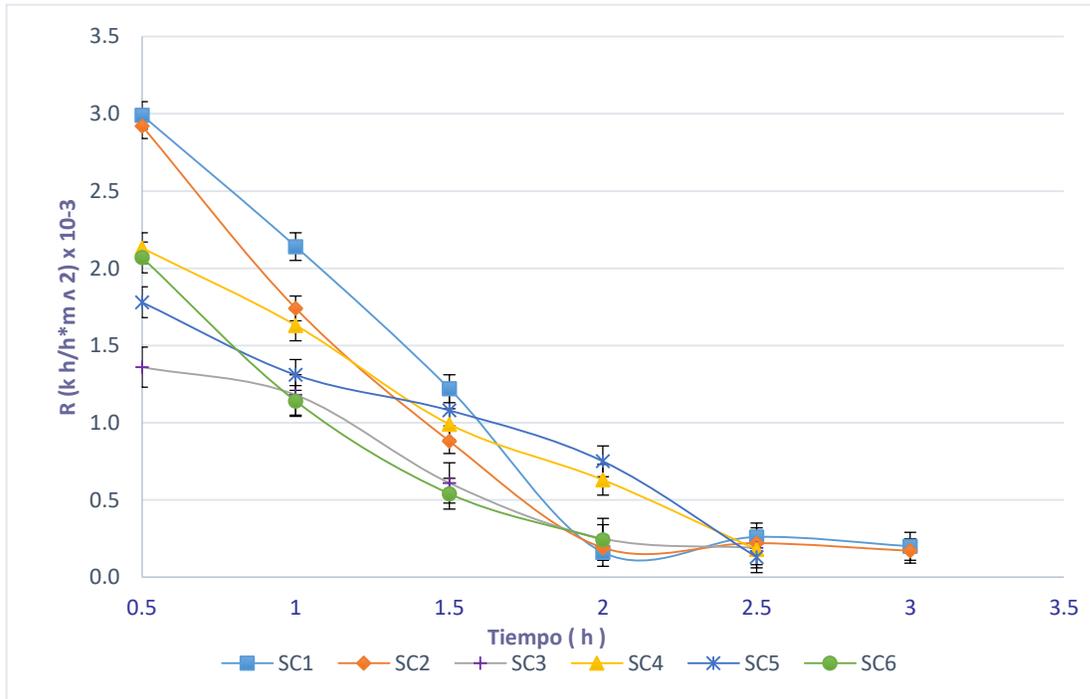


Figura 4.9 Curvas de Flux de secado convectivo en función del tiempo de las muestras de pulpa de aguacate variedad Hass con pretratamiento osmótico.



Las curvas experimentales de flux de secado (R) en función del contenido de humedad libre (X) son mostradas en la Figura 4.10 y 4.11.

Figura 4.10 Curva de flux de secado en función de humedad libre, para las muestras sin pretratamiento osmótico.

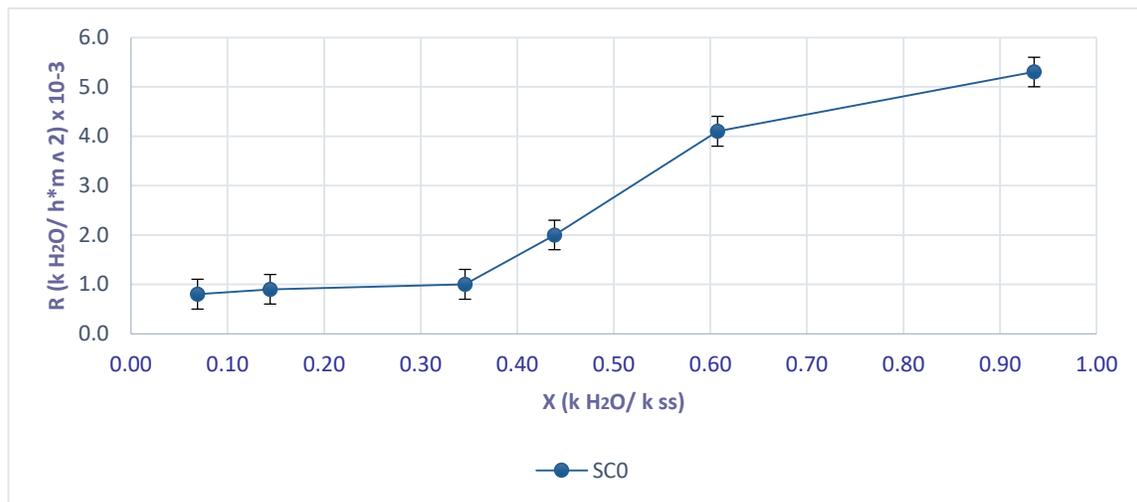
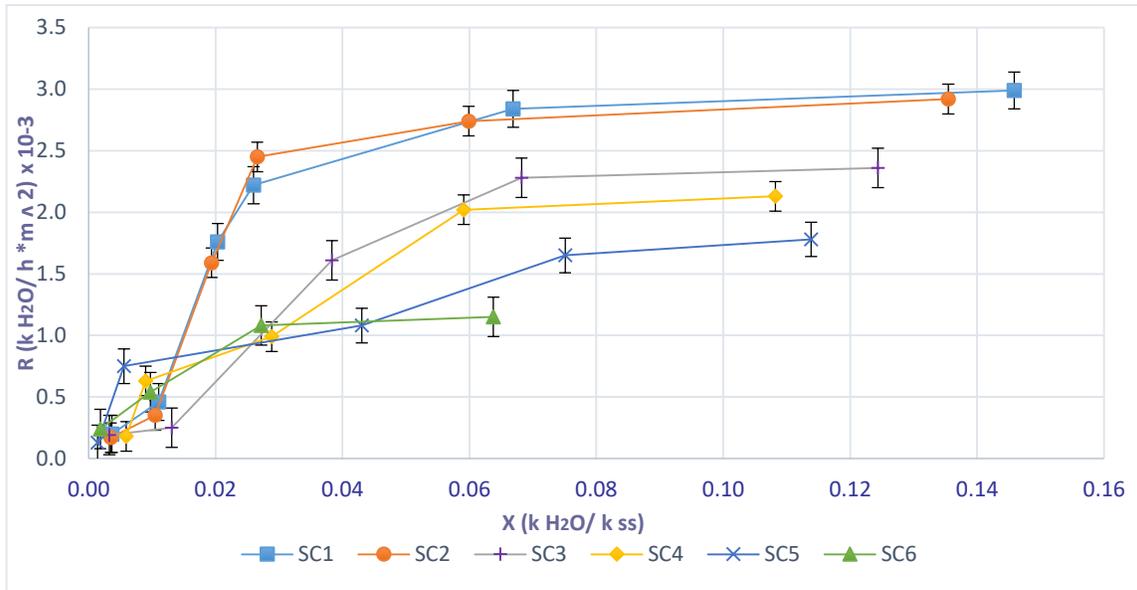


Figura 4.11 Curvas de flux de secado en función de humedad libre, para las muestras de pulpa de aguacate con pretratamiento osmótico.



En la Figura 4.11 se presentan los resultados del método combinado (secado convectivo y secado osmótico). Como los resultados lo sugieren, el flux de secado disminuye conforme en contenido de humedad disminuye.

En la Tabla 4.2 se pueden apreciar los resultados del porcentaje humedad base húmeda inicial (Hbh) y final, así como el tiempo de secado. Las muestras trabajadas durante el experimento no fueron secadas en su totalidad, sino hasta que alcanzaran un periodo donde humedad de la muestras se encontraba entre 20 y 10 % que era al llegar al punto de equilibrio.

Tabla 4.2 Porcentaje de humedad base húmeda inicial y final, duración del secado convectivo con aire a temperatura de 25 °C de la tiras de pulpa de aguacate previamente sometidas a una deshidratación osmótica con sacarosa a 40 y 60 % (m/v) y tres temperaturas (25, 35 y 45 °C).

Concentración del agente osmótico (% m/v)	Temperatura de secado osmótico (°C)	Tiempo de secado convectivo (minutos)	Humedad base húmeda inicial (%)	Humedad base húmeda final (%)
40	25	210	37.0	25.9
	35	210	35.7	24.1
	45	180	31.5	21.4
60	25	180	28.1	17.9
	35	160	25.5	15.1
	45	140	21.3	12.4

Para el análisis del Dew, se consideró como constante al espesor promedio de la muestra el cual es de 3.04 mm, así como área promedio de las muestras fue también considerada como una constante (0.03 m²). A partir de los datos experimentales se estimó el coeficiente de difusividad de agua (Dew), mediante las ecuaciones 1.6, 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, obteniendo la pendiente como lo muestra la Figura 4.12.

Figura 4.12 Obtención del coeficiente de difusividad (Dew) para SC6.

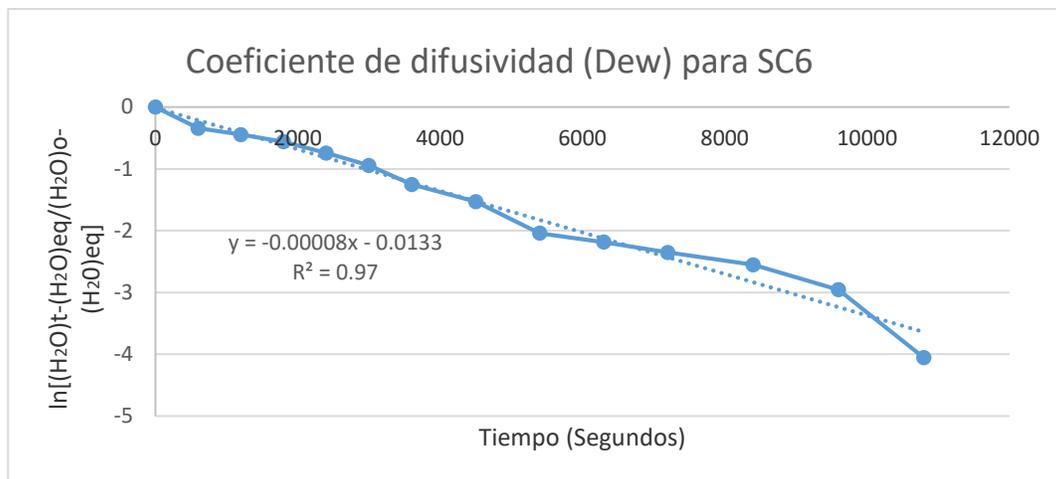


Tabla 4.3 Coeficiente de difusión efectiva de agua durante el secado por arrastre de aire de las tiras de pulpa de aguacate con y sin pretratamiento osmótico.

Tratamiento	D_{ew} m ² /s	R ²
SC0	3.5587×10^{-10}	0.9533
SC1	3.1578×10^{-10}	0.9335
SC2	3.0648×10^{-10}	0.9616
SC3	3.3845×10^{-10}	0.9421
SC4	3.2782×10^{-10}	0.9572
SC5	3.6232×10^{-10}	0.9870
SC6	3.1467×10^{-10}	0.9763

4.2.2 Discusión de los resultados de la cinética de secado convectivo por arrastre de aire

Comparando la Figura 4.8 y 4.9, en donde se grafica el flux de secado en función del tiempo para una muestra sin pretratamiento osmótico y para las muestras con pretratamiento osmótico respectivamente, en donde se comprueba que los tratamientos osmóticos antes del secado convectivo sí tuvieron efecto en la velocidad de secado y el tiempo de operación.

Mientras tanto la Figura 4.10 muestra la gráfica de flux en función de humedad libre para una muestra de tiras de pulpa de aguacate sin pretratamiento osmótico y la Figura 4.11 muestra las gráficas de flux de secado en función del tiempo para las muestras previamente sometidas a una deshidratación osmótica, y es en este tipo de curvas de secado donde se puede apreciar de una manera más clara las características de los periodos de secado. En las curvas de la Figura 4.11 podemos observar que resultados sugieren que, para un flujo de aire constante de 3.2 m/s a temperatura de 25 °C de bulbo seco y una temperatura ambiente promedio de 21.4 °C, el secado se lleva a cabo bajo el control de la difusión de agua, esto es con características típicas del periodo de velocidad decreciente, donde la humedad del producto sigue disminuyendo hasta alcanzar la humedad de equilibrio.

Al inicio de la operación, se observa la tendencia de los datos a seguir un periodo de velocidad constante, donde la velocidad con que se elimina agua de la superficie del sólido es igual que la velocidad con que llega está a la superficie desde el interior del alimento. De esta manera la superficie del material se mantiene constantemente mojada y se comporta como una masa de líquido. En tales condiciones, la temperatura de la interfase permanece constante y el calor que llega al sólido se emplea totalmente en evaporar el líquido. De acuerdo con la discusión, presentada en el Capítulo 1, esto sugiere que el contenido de humedad, en su mayoría, se encuentra como agua ligada y que una pequeña concentración se encuentra como agua libre. Esta tendencia es muy similar a lo que reporta Lahsasni (2004) sobre cinética de secado en tuna, donde el secado se realiza prácticamente bajo el control del periodo de velocidad decreciente.

Al comparar estos resultados con la muestra control, podemos notar que en ambas gráficas existen dos periodos de velocidad, el decreciente y el periodo constante, aunque se puede notar cómo los periodos de velocidad constante son más cortos para las muestras sometidas a pretratamiento osmótico que para la muestra control; esto puede deberse a que la cantidad de agua disponible en la muestra control es evidentemente mayor que el agua presente en las muestras con pretratamientos.

Se observó que las muestras del SC6 tuvieron el tiempo de secado más breve con sólo 140 minutos (Tabla 4.2); como era de esperarse, debido a que es una muestra que fue sometida a un secado osmótico a 45 °C y una concentración del agente osmótico de 60 % (m/v) y a su vez contenía la menor cantidad de Hbh inicial de todas las muestras evaluadas, resultando de esta manera un menor tiempo de operación de secado por arrastre de aire. De esta forma se considera que podría establecerse una disminución en el consumo de energía por efecto de la reducción de los tiempos de secado.

a) Difusión para el proceso de secado convectivo por arrastre de aire

Los resultados de coeficientes de difusión efectiva de agua de las tiras de pulpa de aguacate que fueron sometidas previamente a una deshidratación osmótica, se presentan en la Tabla 4.3 y a los que se les realizó un análisis de varianza donde las muestras no presentan diferencia significativa y en la prueba de comparación múltiple de medias tampoco se encontró diferencia significativa entre los tratamientos.

La solución de Crank a la segunda ley de Fick, para la geometría de placa plana de longitud infinita, mostró que este modelo describe adecuadamente la cinética de pérdida de agua para el secado convectivo, al obtenerse valores de coeficientes de correlación para Dew que varían de 0.9335 hasta 0.9870.

Debido a que las condiciones de temperatura y velocidad del aire se mantienen constantes para todos los tratamientos. Los valores obtenidos en las difusividades en esta etapa del secado convectivo se compararon con los resultados de difusividad reportados por Zogzas et al., (1996) para aguacate deshidratado en condiciones de secado al aire a una temperatura de 31 a 56 °C quienes reportan difusividades de 1.1 a 3.3×10^{-10} m²/s.

4.3 Composición proximal

El análisis químico proximal de las tiras de aguacate del grupo control o sin tratamiento, así como el análisis a las tiras resultantes después de los tratamientos de secado combinado, se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Composición química proximal expresada en porcentaje de las tiras de pulpa de aguacate después de los tratamientos de secado combinado y el grupo control.

Determinación	Grupo control	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6
Humedad (%)	70.29	29.53	25.23	22.05	21.19	16.95	12.35
Cenizas (%)	3.23	8.03	9.51	9.20	8.57	7.75	8.10
Lípidos (%)	16.21	36.88	39.12	39.04	42.46	42.31	43.42
Proteínas (%)	2.29	4.58	5.59	6.15	5.71	6.26	4.61
Hidratos de carbono reductores totales (%)	7.97	20.98	20.54	23.56	22.07	26.73	31.52

Después del proceso de secado combinado se realizaron los análisis químicos y físicos de las tiras de pulpa de aguacate resultantes de los seis tratamientos. En la Tabla 4.4 se muestran los valores obtenidos experimentalmente, con el objetivo de tener una apreciación más objetiva de las modificaciones que se provocan después del proceso de secado combinado.

Se observa cómo después de los procesos de secado combinado, la humedad más alta fue de 29.53 %, correspondiente al tratamiento SC1; mientras que la humedad más baja fue de 12.35 %, correspondiente al tratamiento SC6. Al ser comparadas con la humedad del grupo control, el cual no fue sometido a ningún tratamiento de secado y cuya humedad fue de 70.29 %, se puede apreciar que

hay una reducción significativa de humedad. Los tratamientos SC4, SC5 y SC6 fueron los que lograron obtener una menor humedad y fueron aquellos en los que se trabajó con una mayor concentración del agente osmótico. Por otra parte, al considerar la concentración del agente osmótico como constante, notamos cómo aquellos tratamientos que se trabajaron a mayor temperatura durante la deshidratación osmótica fueron los que mayor cantidad de humedad perdieron. De todos los tratamientos realizados, el SC6 resultó ser el más efectivo al mantener sólo un 12.35 % de humedad final.

Respecto a la cantidad de hidratos de carbono reductores totales, se puede observar que los resultados correspondientes a los tratamientos de los secados combinados son mayores en comparación al grupo control y este comportamiento va ligado al aumento de la concentración de la solución osmótica de sacarosa y la temperatura con la que dichos tratamientos fueron tratados durante la deshidratación osmótica.

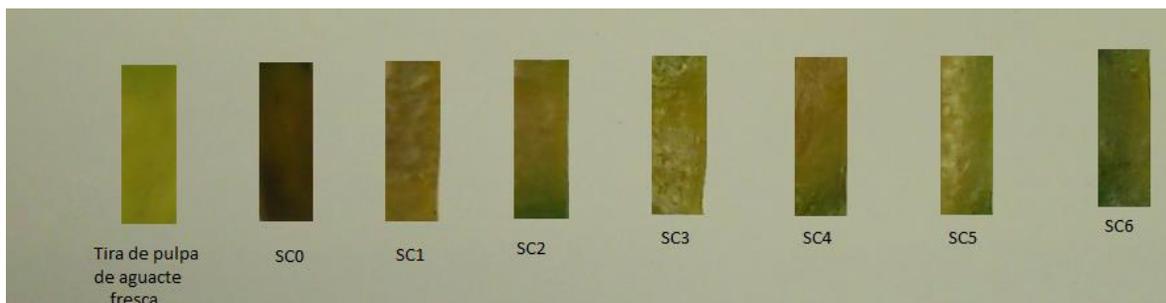
Este hecho es causado por la incorporación de sacarosa dentro de la estructura del alimento por diferencia de la concentración que existe entre la muestra y la solución hipertónica. Lo anterior puede explicarse debido a que la absorción del azúcar no es sencilla a concentraciones y temperaturas bajas, pero conforme aumenta la presión osmótica y temperatura, se pueden estar abriendo los poros, dejando mayor espacio para la entrada de sólidos. Estos datos concuerdan con los resultados Heng et al. (1990) y Raoult-Wack (1994) en los que tratamientos que se trabajaron a mayor temperatura obtuvieron una mayor ganancia de hidratos de carbono reductores.

Por último el aumento en el porcentaje de cenizas, proteínas y lípidos, es mucho más significativo para el caso de los lípidos pero es una consecuencia de la reducción de humedad debido a los procesos de secado. El cambio en la composición química de las tiras de pulpa de aguacate, después de los tratamientos de secado, es en proporción a la reducción de humedad.

4.4 Calidad de las tiras de pulpa de aguacate deshidratadas por el método combinado

Los distintos tratamientos de secado combinado, efectuados a las tiras de pulpa de aguacate, arrojaron productos con diferencias que iban desde la textura y el color, hasta el sabor. En la mayoría de las muestras trabajadas se observa a simple vista que conservan un color muy similar al del aguacate fresco y también muchas de ellas muestran una agradable textura semi crujiente al momento de romperlas y masticarlas (ver Figura 4.13).

Figura 4.13 Fotografía de las tiras de pulpa de aguacate variedad Hass deshidratadas por medio del método combinado (osmótico y convectivo), junto a una tira de pulpa de aguacate fresca tomada como grupo control y una tira de pulpa de aguacate secada sólo por medio del secado convectivo (SC0).



En la Figura 4.13 las tiras de pulpa de aguacate que fueron sometidas a tratamientos de secado combinado, presentan un ligero oscurecimiento el cual no se observa en la tira de pulpa de aguacate fresca del grupo control.

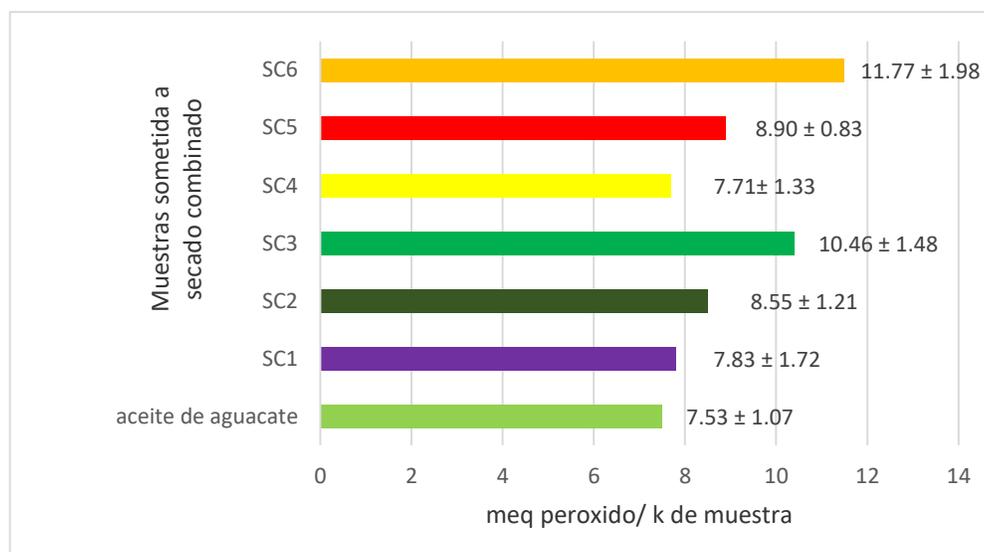
El oscurecimiento que presentan las tiras de pulpa de aguacate que fueron sometidas al secado combinado es mucho menor que el presente en la tira del grupo SC0, grupo que sólo fue sometido al secado convectivo para determinar la duración de este proceso así como los efectos sensoriales sobre la pulpa, y esto puede ser a causa de que antes de la deshidratación osmótica las tiras de pulpa de aguacate fueron bañadas en una solución de ácido ascórbico al 0.7 % (m/v) y a

que la solución osmótica usada para los distintos tratamientos, fue enriquecida con benzoato de sodio y ETDA el cual es un agente quelante que actúa como secuestrador del cobre, impidiendo que la enzima fenolasa tenga actividad, y de esta forma se logra inhibir el oscurecimiento enzimático; por otro lado el uso de ácido ascórbico inhibe la actividad enzimática debido a su acción reductora y/o interacción directa con el complejo enzimático.

4.4.2 Análisis de calidad los aceites obtenidos. Efecto del secado combinado sobre del aceite extraído las tiras de pulpa de aguacate por medio del índice de peróxido (IP) e índice de yodo (IY)

Para comparar los resultados obtenidos de IP e IY del aceite extraído de las tiras de pulpa de aguacate deshidratadas en las diferentes condiciones del proceso de secado combinado, se analizaron conjuntamente con una muestra de aceite extraído de la pulpa de aguacate sin tratamiento. En las Figuras 4.14 y 4.15 se muestran los valores obtenidos para dichos parámetros.

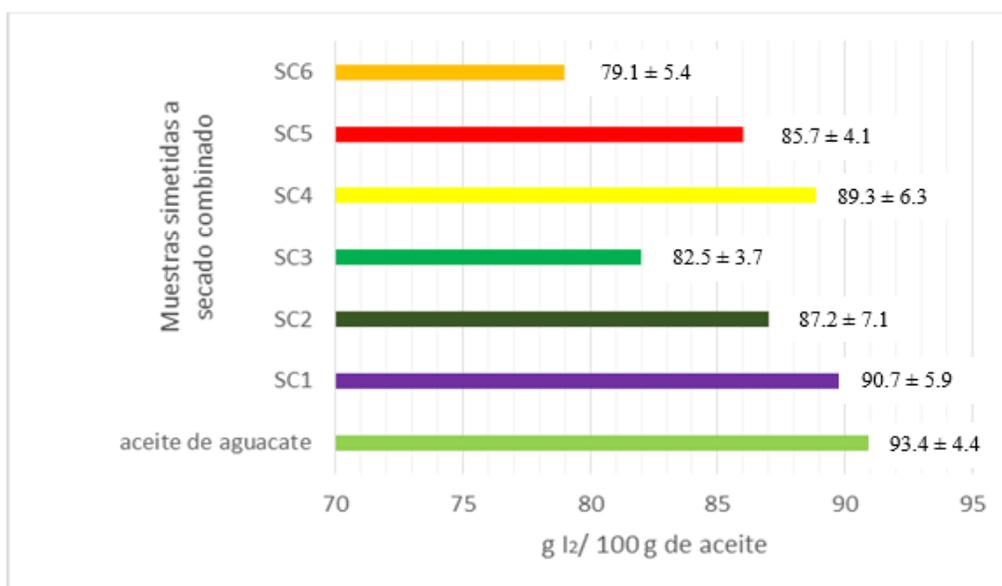
Figura 4.14 Determinación de índice de peróxido en aceites extraídos de muestras deshidratadas por medio del método combinado.



El índice de peróxidos es un indicador del grado de oxidación de aceites y grasas. En la Figura 4.14 se observa que el valor promedio, obtenido del análisis de índice de peróxido del aceite de pulpa de aguacate extraído de una muestra sin tratamiento, llegó a ser de 7.53 ± 1.07 meq peróxido / k de aceite. En los resultados de las muestras de aceite pertenecientes a los distintos tratamientos de secado combinado, se tiene que el valor de peróxido va aumentando conforme las muestras fueron sometidas a mayor temperatura, durante la etapa de secado osmótico, llegando a alcanzar un valor de 11.77 ± 1.98 meq peróxido / k de aceite. Esto indica que está existiendo una oxidación del aceite conforme aumentan las condiciones de temperatura durante el secado osmótico, formando hidroperóxidos, los cuales no dan olor ni sabor, pero al romperse, rápidamente forman aldehídos, que podrían proporcionar sabores y olores desagradables. White (1995) expuso que los aceites refinados preferiblemente deben tener un valor de peróxidos por debajo de 1 meq / k de aceite, sin embargo, se pueden permitir valores de hasta 10 meq / k de aceite, debido a que la rancidez sensorial se percibe en los valores por encima de 10 meq / k tanto para aceites crudos y refinados (Crapsiste et al. 1999).

Tomando en cuenta lo anterior, los aceites de este estudio se encuentran dentro de los límites establecidos por estos autores, con excepción del aceite extraído de la muestra SC6 la cual sobrepasa ligeramente los límites. Sin embargo se deben de cuidar las condiciones de almacenamiento como la exposición prolongada al aire, debido a que la cantidad de oxígeno absorbido para producir rancidez varía considerablemente con la composición del alimento de estudio, y al estar trabajando con una muestra como el aguacate, que posee un alto contenido de ácido oleico, linoleico y palmítico es muy probable que se pueda enranciar con menor absorción de oxígeno.

Figura 4.15 Determinación del índice de yodo en aceites extraídos de muestras deshidratadas por medio del método combinado.



El índice de yodo es una expresión del grado de insaturación de los ácidos grasos que componen un aceite y es utilizado para caracterizar diferentes aceites vegetales, por ello si es bajo, significa que la cantidad de ácidos grasos saturados y/o mono insaturados es alta (Zamora, 2009).

Los valores de índice de yodo, tanto para las muestras sometidas a los distintos tratamientos de secado combinado como para la muestra de aceite extraída de una muestra de pulpa de aguacate fresca, fueron altos (Figura 4.15), y esto se asocia a un alto contenido de ácido oleico, linoleico y palmítico presente en el aceite de aguacate.

Diversos autores han publicado valores de índice de yodo para el aceite de aguacate crudo extraído por diferentes métodos, por ejemplo Turatti et al. (1985) reportan valores de índice de yodo de 93 g I₂ /100 g, Jiménez et al. (2001) por su parte reporto valores de 84.34 a 92.59 g I₂/100 g. El valor promedio obtenido en este estudio para la muestra perteneciente a la pulpa de aguacate fresca, se encuentra dentro de lo reportado por estos autores.

En la Figura 4.15, se observa que el índice de yodo de las muestras que se sometieron al proceso de sacado combinado va disminuyendo en comparación con la muestra perteneciente a la pulpa de aguacate fresca cuyo valor fue de 93.4 ± 4.4 g I₂/100 g de aceite y, de un valor de 90.7 ± 5.9 g I₂/100 g de aceite extraído de la muestra SC1 hasta un valor de 79.7 ± 5.4 g I₂/100 g de aceite extraído de la muestra SC6; lo que indica que conforme aumenta la concentración y temperatura durante el secado osmótico, y posteriormente se es sometido al secado por convección forzada a temperatura ambiente, los valores de índice de yodo disminuyen. Esto indica pérdida de dobles enlaces por oxidación del aceite.

De acuerdo con la Norma Mexicana (NMX-F-052-SCFI-2008) el valor mínimo para el índice de yodo en el caso del aceite refinado de aguacate es de 85-90 g I₂/100 g, por lo tanto los valores obtenidos para el aceite extraído de las muestras deshidratadas por medio del método de secado combinado, se encuentran dentro de los valores establecidos según esta norma, a excepción de las muestras SC3 y SC6 y esto puede deberse a que estas muestras se sometieron durante un largo periodo de tiempo a temperatura de 45 °C, durante la deshidratación osmótica.

4.5 Evaluación sensorial del producto

Para conocer la aceptación de los productos obtenidos bajo las diferentes condiciones de operación utilizadas en el presente trabajo, se decidió realizar una prueba de nivel de agrado de nueve puntos a 54 residentes de la unidad habitacional ISSSTE universidad de los cuales 37 fueron mujeres entre 24 y 58 años y 18 eran hombres entre 21 y 63 años

Los resultados de los cuestionarios previos a la prueba de nivel de agrado se muestran a continuación en las Figuras 4.16 y 4.17 los cuales presentan los resultados en porcentaje.

Figura 4.16 Porcentaje de consumo de aguacate fresco.

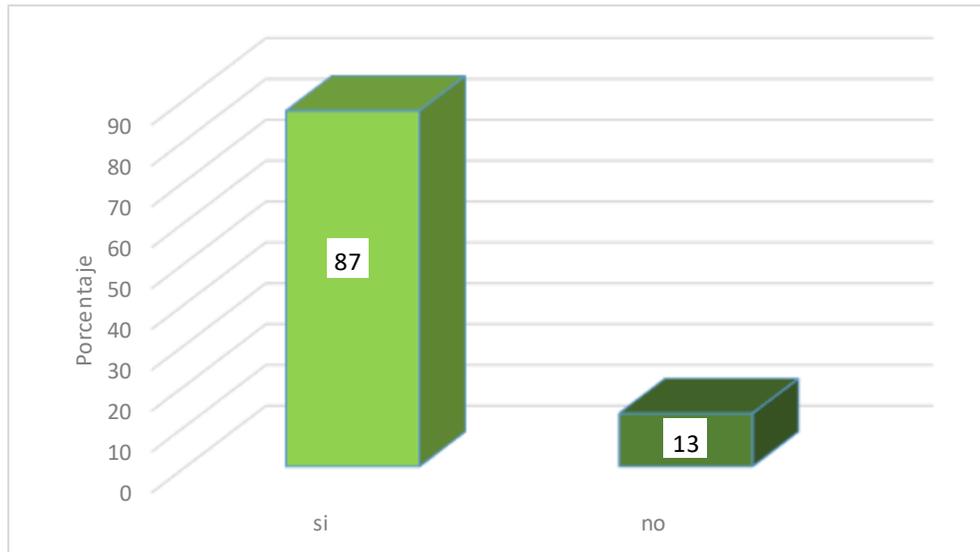
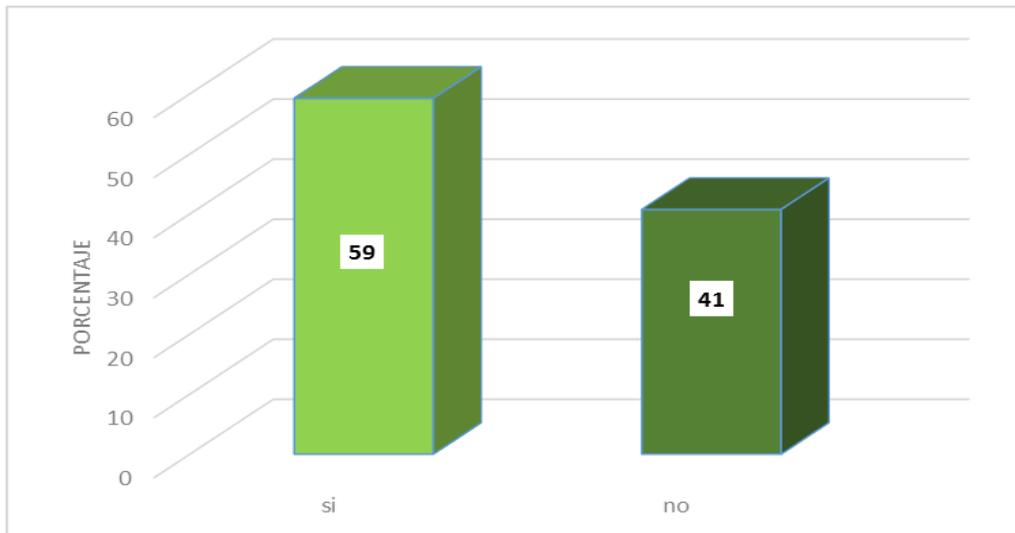


Figura 4.17 Porcentaje de consumo de alimentos deshidratados.



De los 54 consumidores, 47 consumen aguacate fresco regularmente un 87 % de nuestra población de estudio, mientras que sólo el 13 % de esta misma población consume alimentos deshidratados.

A continuación se presenta la Tabla 4.5 donde se encuentran los resultados de la prueba de nivel de agrado en una escala hedónica de 9 puntos para las tiras de

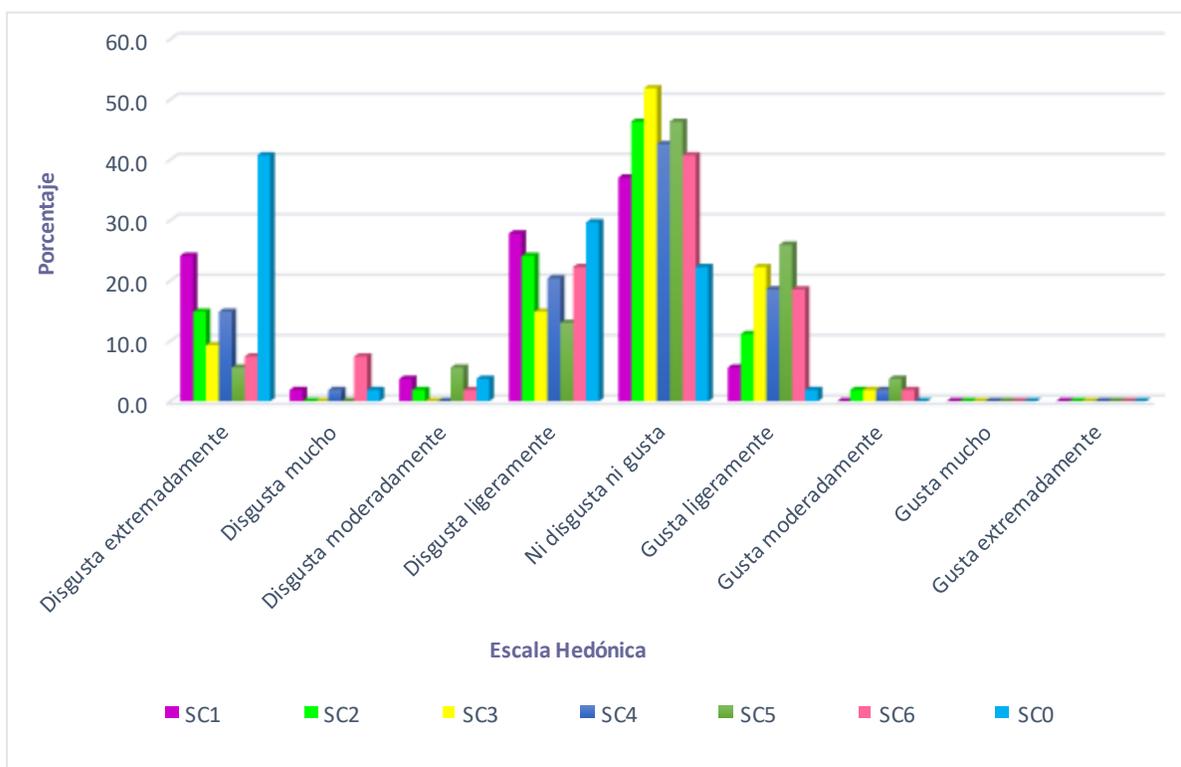
pulpa de aguacate deshidratadas por medio de los diferentes tratamientos de secado.

Tabla 4.5 Frecuencia de agrado representada en porcentaje de las diferente muestras evaluadas por 54 jueces.

Escala Hedónica	SCO	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6
Disgusta extremadamente	18.52	7.41	0.00	0.00	3.70	0.00	1.85
Disgusta mucho	18.52	5.56	12.96	0.00	12.96	5.56	5.56
Disgusta moderadamente	9.26	16.67	3.70	9.26	0.00	5.56	9.26
Disgusta ligeramente	29.63	27.78	24.07	14.81	20.37	12.96	22.22
Ni disgusta ni gusta	22.22	37.04	46.30	51.85	42.59	46.30	40.74
Gusta ligeramente	1.85	5.56	11.11	22.22	18.52	25.93	18.52
Gusta moderadamente	0.00	0.00	1.85	1.85	1.85	3.70	1.85
Gusta mucho	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gusta extremadamente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Para este ensayo se utilizó el test hedónico de nivel de agrado. En ésta prueba los panelistas seleccionaron entre las muestras ofrecidas, indicando en la hoja de evaluación qué tanto les agradaba cada una de ellas. Los resultados de las evaluaciones totales, a las siete muestras de tiras de pulpa de aguacate deshidratado, se analizaron utilizando un sistema de puntuación en una escala de 1 al 9 según la opción elegida en la escala hedónica siendo 1 el valor asignado para la opción disgusta extremadamente y siendo 9 el valor para la opción gusta extremadamente. Esta información se encuentra representada en la Figura 4.18.

Figura 4.18 comparación nivel de agrado entre las muestras deshidratadas por medio del método combinado



Resultó que de las muestras, dentro de la escala de evaluación, ninguna llegó a gustar extremadamente ni a gustar mucho; además las muestras que se habían sometido a tratamiento osmótico con una concentración de sacarosa de 60 % (m/v) a una temperatura de proceso de 35 °C y que después fueron secadas por medio de un secado convectivo con aire a temperatura de 25 °C, fueron las que lograron un mayor porcentaje de preferencia positiva pues al 3.7 % de los participantes le gustó moderadamente mientras que al 26 % les gustó ligeramente.

Se realizó un análisis de varianza utilizando un nivel de confianza del 95 %, en el que se evaluaron a los tratamientos y jueces, y la variable de respuesta medida fue la calificación asignada a la escala hedónica. Con respecto a la variación entre jueces y entre tratamientos, el resultado de este análisis detectó que existe diferencia significativa a causa de los jueces o penalistas así como de los

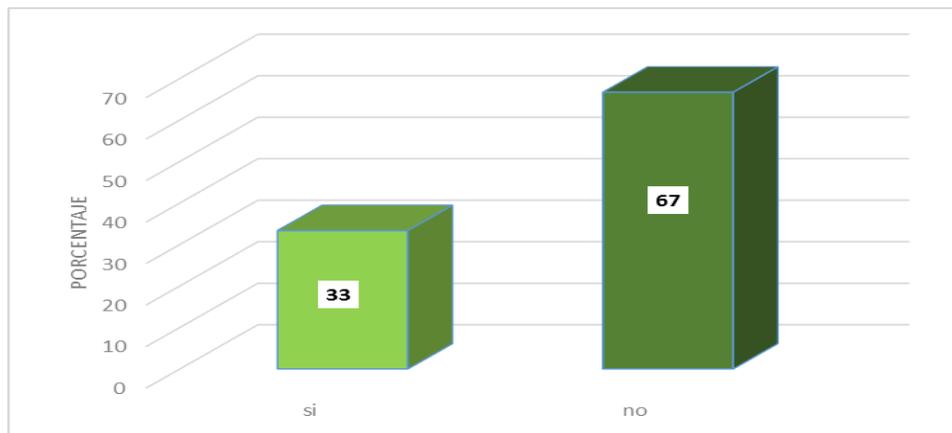
tratamientos. La variación entre jueces es significativa y se debe señalar que los jueces 1,2 y 4 dan puntuaciones más bajas que los demás jueces. Por otra parte, es importante mencionar que la interacción juez / muestra no es significativa y por ello no se puede afirmar que los jueces discrepen en el uso de la escala.

Al continuar examinando los resultados obtenidos por medio del análisis de varianza con respecto a la variación entre tratamientos, se observó que la F_{exp} es mayor que F_{tab} por lo tanto las diferencias en las condiciones de los tratamientos de secado combinado de las muestras evaluadas son definitivamente una fuente de variación. Una vez conocido esto, se debe determinar cuál o cuáles de los tratamientos son los que difieren y así poder llegar a deducir el mejor tratamiento.

Se realiza una prueba de comparaciones múltiples y para este estudio se utilizó la prueba de comparación múltiple de medias de acuerdo con el criterio de Tukey y de este análisis se pudo observar cómo el tratamiento SC5, SC3, SC1 y SC0 presentaron una diferencia significativa en relación a las otras muestras, mientras que las muestras SC6, SC4 y SC2 no se detectó diferencia estadísticamente significativa entre muestras y estas fueron las que obtuvieron un puntaje total en la escala de preferencias similar.

El porcentaje de personas que consumirían las tiras de pulpa de aguacate deshidratadas (Figura 4.19) resultó del 33 %, una cantidad baja si se considera que de este grupo el 87 % dijo consumir aguacate y el 57 % dijo consumir alimentos deshidratados. Los panelistas hicieron comentarios, particularmente negativos; principalmente en relación con el sabor ligeramente amargo, del color pardo y textura blanda que llegaban a presentar algunas de las muestras evaluadas.

Figura 4.19 Porcentaje de personas que consumirían regularmente tiras de pulpa de aguacate deshidratadas.



En conclusión mediante la prueba de nivel de agrado y comentarios ofrecidos por los panelistas, se pudo determinar que las muestras pertenecientes al grupo SC5 tuvieron la mejor evaluación en términos de agrado. Esto puede deberse que estas muestras tienen en particular, una textura crujiente, así como un sabor y color similar al del aguacate fresco que agrado a los jueces. Las tiras de pulpa de aguacate que fueron sometidas al tratamiento SC5 durante la deshidratación osmótica, se trabajaron con una solución de sacarosa de muy alta concentración (60 % m/v) y también se trabajaron a una temperatura de 35 °C con la cual es poco probable que se formen compuestos responsables de provocar un sabor amargo como el 1-Acetoxi-2,4-Dihidroxin-Heptadiqueno que puede aparecer al someter las muestras de aguacate a temperaturas superiores a 100 °C (Bennet et al., 1973), y por último el color de la muestra, no se ve muy afectado por el oscurecimiento enzimático gracias a la temperatura de trabajo así como al uso de EDTA y ácido ascórbico.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados experimentales conseguidos en el presente trabajo se logra concluir que:

- Por medio de las curvas de secado osmótico, se demostró que el aumento de la concentración del agente osmótico y la temperatura influyen directamente en el aumento de WL (Pérdida de Agua) y de SG (Ganancia de Sólidos).
- Se determinó que las mejores condiciones de trabajo durante la deshidratación osmótica se lograron con el tratamiento SO6, a una temperatura de 45 °C y una concentración de sacarosa de 60 % (m/v), con el que se alcanzó una mayor WL y fue significativamente diferente a los demás tratamientos por medio de la prueba de Tukey al 95 % de confianza.
- Los coeficientes de difusividad obtenidos para la deshidratación osmótica y secado convectivo a partir de la solución de Crank a la segunda ley de Fick, para la geometría de placa plana de longitud infinita, mostraron que este modelo describe adecuadamente la cinética de pérdida de agua, al obtenerse valores de coeficientes de correlación que varían de 0.9232 hasta 0.9606, determinándose coeficientes de difusión efectiva de agua para la deshidratación osmótica que van de 8.8280×10^{-11} hasta 2.1061×10^{-10} . Además se demostró que la difusión es un fenómeno dependiente de la temperatura y en menor medida de la concentración mientras que el coeficiente de difusividad de sólidos se encuentra mayormente influenciado por la concentración.
- Se encontró que las características del periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente predominan durante el secado por

convención forzada de las tiras de pulpa de aguacate sometidas previamente a una deshidratación osmótica.

- Se determinó que el tratamiento SC6 fue el más óptimo al tener el tiempo de secado más breve, con sólo 140 minutos.
- De acuerdo con los resultados obtenidos de los secados junto a los parámetros fisicoquímicos de calidad y análisis sensorial, convierten al tratamiento SC5 en la mejor alternativa para la conservación del producto por medio de una deshidratación osmótica con sacarosa al 60 % (m/v) a 35 °C y un posterior secado por convección forzada a temperatura de bulbo seco 25 °C, velocidad de aire de 3.2 m/s durante 160 minutos. Dando como resultado un producto con un contenido de humedad de 16.95 %, lípidos 42.3 %, proteínas de 6.26 %, IP de 8.90 ± 0.83 meq peróxido / K de aceite y un IY de 85.7 ± 4.1 g I₂/100 g de aceite.

RECOMENDACIONES

Los datos experimentales en este trabajo sólo abarcaron el secado convectivo a temperatura de bulbo seco de 25 °C, ya que esta era la única temperatura que se podía mantener constante debido a problemas con la resistencia, que no permitían mantener la estabilidad de temperaturas superiores a la ya mencionada. Esperando que en un futuro se logre un adecuado funcionamiento de la resistencia, se recomienda complementar y mejorar el estudio cinético, realizando los secados por arrase de aire a temperaturas de 35 y 45 °C, y de esta manera se pueden reducir los tiempos de operación y estudiar de una manera más profunda la influencia de la temperatura en la cinética de secado convectivo.

Durante este estudio se trabajó con la sacarosa por cuestiones de tiempo y accesibilidad de material prima pero si se es posible, en el futuro, se podría complementar el estudio de secado osmótico analizando el comportamiento cinético de las muestra de pulpa de aguacate con algún otro agente osmótico o mezcla de estos cómo por ejemplo maltodextrina, glucosa, NaCl, fructuosa o almidones y poder determinar el efecto de estos agentes por medio del cálculo de la difusividad efectiva de agua y de los sólidos.

REFERENCIAS

1. Arriola, G.E. (2006). *Comportamiento del aguacate liofilizado durante la operación de rehidratación*. México. Revista mexicana de ingeniería química. UAM. Vol.5, pp.51-56.
2. Astiasarán, I. & Martínez, J. (2000). *Alimentos: composición y propiedades*. España. Mc Graw Hill-Interamericana. p. 364.
3. Anzaldúa, A. (1994). *La evaluación sensorial de los alimentos, en la teoría y la práctica*. España.Ed. Acribia. pp. 67-78, 131-136.
4. Azuara, E., Cortés, R., García, H., & Beristain, C.I. (1992). *Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law*. International Journal of Food Science and Technology. Vol.27. pp. 409-418.
5. Badui, S. (2006). *Química de los alimentos*. Cuarta edición. Editorial Pearson Addison Wesley. pp. 1-28.
6. Barbosa, G. & H, Vega. (2002): *Deshidratación de alimentos*. España Editorial Acribia S.A. p. 325.
7. Bennet, G., Dolev, A. & Tatarsky, D., (1973). *Compounds contributing to heat induced bitter off flavor in avocado*. Journal Food Science technology. pp.38, 546.
8. Biale, J.B., & Young, R.E. (1962). *The avocado pear in the biochemistry of fruits on their products*. Acad. Press. Vol. 2. pp.32-33.
9. Biswal, R., & Le Maguer, M. (1989). *Mass transfer in plant materials in contact with aqueous solution of ethanol and sodium chloride: equilibrium data*. Journal Food process Engineering. Vol. 11. pp.159-176.
10. Cornejo, M. (2010). *Deshidratación de rebanadas de aguacate variedad Hass por el método osmo-vac (osmótico-vacío) y evaluación de la calidad del producto*. Tesis IPN. México D.F. p. 27.
11. Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. U.K. Second Edition. Clarendon. Vol. 2. pp. 11-68.
12. Crapiste, G.H. (1999). *Simulation of drying rates and quality changes during the dehydration of foodstuffs. In Trends in Food Engineering*. Pennsylvania, USA. Ed. Technomic. pp. 256-259.
13. Cutting, M., Bower, P., Wolstenholme, N., & Hofman, P. (1990). *Changes in ABA, polyphenol oxidase, phenolic compounds and polyamines and their*

- relationship with mesocarp discolouration in ripening avocado (Persea americana Mill). Fruit. J. Hort. Vol. 65. pp.465-471.*
14. Cummings, K., & Schroeder. (1942). *Anatomy of the avocado fruit*. California. Avocado Society Yearbook. Vol. 26. pp. 56-64.
 15. Devlin, R.M. (1982). *Fisiología vegetal*. University of Massachusetts. España. 3er. Ed. Omega. pp.221-222.
 16. Dorantes, A.L. (1978). *Purificación y estudio de algunas características de la polifenoloxidasas del aguacate*, Tesis de Maestría, E.N.C.B., IPN. México. pp. 55-58.
 17. Eaks, I.L. (1978). *Ripening, chilling injury and respiratory response of Hass and Fuerte avocado fruits at 20° to 40°C*. J.Amer.Soc.Hort.Sci.103. Vol.5. pp. 576-578.
 18. FAOSTAT (2015). *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Consultado en Agosto del 2015. Disponible en: <http://faostat.fao.org/faostat>
 19. García, R., Andrade, J. & Roiz, C. (1975). *Effect of temperature and heating time on the detection of flavor in avocado past*. J. Food. Vol. 40. p. 200.
 20. Geankoplis, J., & Christie. (1995). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. México. Ed. CECSA. pp. 434-490
 21. Grabowski, S., Mujundar, A.S., Ramaswamy, H.S., & Strumillo, C., (1994). *Osmoconvective drying of grapes*. J.Drying Technology.12. Vol. 5. pp. 1211-1299.
 22. Heng, K., & Guilbert, S. (1990). *Osmotic Dehydration of Papaya: Influence of process variable on the product quality* Sci. Aliment. Vol.10. pp. 831-848.
 23. Hernández, M., Chavez & Bourges, H., (1979). *Valor nutritivo de los alimentos mexicanos*. México, D.F. Instituto Nacional de la Nutrición. p. 1985.
 24. InfoAsrca. (2002). Consultado en Junio 27 de 2015. Disponible en : <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/110/ca110.pdf#page=3>
 25. Jiménez, E., Aguilar, R., Zambrano, L., & Kolar, E. (2001), *Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas*. Journal of the Mexican Chemical Society. Vol.45. pp. 89-92.

26. Kirk, R. S., Sawyer, R & Egan, H. (1996) *Composición y análisis de alimentos*. México. Ed. Compañía editorial continental SA de CV. pp.76-82.
27. Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz M., & Jaouhari. J.T. (2004). *Drying kinetics pear fruit (opuntia ficus indica)*. Journal of food engineering. Vol. 6. pp.173-179.
28. Lazarides. (1995). *Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake*. Journal of Food Engineering Vol.25. pp.15-166.
29. Lee, S.R., Young, P., & Schiffman, C. (1983). *Maturity studies of avocado fruit based on picking dates and dry weight*. Am. Soc. Hortic. Vol. 108.pp. 390-394.
30. Lenart, A. & Flink, J.M. (1984a), *Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end-point of the osmosis process*. Journal Food Technology. Vol.19. pp. 45-63.
31. Lenart, A., & Flink, J.M. (1984b). *Osmotic concentration on potato. II. Spatial distribution of the osmotic effect*. Journal of Food Science and Technology. Vol.19.pp. 65-89.
32. Lewis, C.E., Morris, R., & O'Brien, K., (1978). *The oil content of avocado*. Journal of Science Food and Agriculture.Vol.29. pp.943-949.
33. Lobo, R. (1997). *Principios de transferencia de masa*. UAM. México. p. 533.
34. Méndez P.O. (2006). *El tamaño y la composición de las lipoproteínas de alta densidad (HDL) se modifican en la rata por una dieta suplementaria con aguacate Hass (Persea Americana Mill.)*. Instituto Nacional de Cardiología. 77. Vol.1.pp.17-24.
35. Markowski, M., (1997). *Air drying of vegetables: evaluation of mass transfer coefficient*. Journal of Food Engineering.34. Vol. 1.pp. 55-62.
36. Nielsen, S. (2003). *FOOD ANALYSIS LABORATORY MANUAL*. Nueva York. Kluwer Academic/Plenum Publishers. pp. 14-15.
37. NMX-F-052-SCFI-2008. Aceites y grasas: aceite de aguacate, especificaciones. Norma Mexicana.
38. NMX-F-066-S-1978. Determinación de Cenizas en Alimentos, especificaciones. Norma Mexicana.

39. Parjoko, K.A., Rahman, M.S., Buckle, K.A., & Perera, C.O., (1996). *Osmotic dehydration kinetics of pineapple hedges using palm sugar*. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*. Vol.29.pp. 452-459.
40. Pedrero, D. (1996). *Evaluación sensorial de los alimentos. Métodos analíticos*. México. Ed. Alhambra Mexicana. pp.56-63.
41. Pointing, J.D., Walter, G.G., Forrey, R.R., Jackson, R., & Stanley, W.L. (1996). *Osmotic dehydration of fruits*. *Food technology*. Vol.5. pp.255-260.
42. Proceedings V World Avocado Congress, 2003.pp 741-748.
43. Rahman, S. & Perera, C. (1996). *Osmotic dehydration: a pretreatment for fruit and vegetables to improve quality and process efficiency*. *The Food Technologist*. Vol. 25. pp. 144-147.
44. Raoult-Wack, A.L., Lenart, A., & Guilbert, S. (1992). *Recent advances in dewatering through immersion in concentrated solutions ("Osmotic dehydration")*. En: *Drying of solids*. Ed. Mujumdar. pp. 21-51.
45. Rastogi, K. & K. Raghavarao., (2004). *Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration*. *Lebensm.-Wiss. Und Technol.* 37. Vol.1.pp. 43-47.
46. Rastogi, N.K., Angersbach, A. & Knorr, D., (2000). *Synergistic effect of high hydrostatic pressure pretreatment and osmotic stress on mass transfer during osmotic dehydration*. *Journal of Food Engineering*. Vol.45.pp. 25-31.
47. Rastogi, N.K., Raghavarao K.S.M.S & Niranjana. K., (1997). *Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration*. *Journal of food engineering*. Vol.31.pp. 423-432.
48. Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., & Niranjana, K., (2002). *Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer*. *Food Science Technology*. Vol.3.pp.45-59.
49. Reyes A.J.C. (2010) *Guía técnica del cultivo de aguacate*, Fundación Salvador Sánchez Colín, CICTAMEX, S.C Gobierno del Estado de México. p.1.
50. Sablani, S & Rahman S. (2003). *Effect of syrup concentration, temperatura and simple geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango*. *Food Research International*. Vol.36.pp. 65-71.
51. SAGARPA, SFA, *La monografía del aguacate*. (2011). p.1-9.

52. Saputra, D. (2001). *Osmotic Dehydration of pineapple*. Drying Technology 19. Vol.2.pp. 415-425.
53. Saurel R., Raoult- Wacck A., Ríos G.,& Guilbert S., (1994). *Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple.II.frozen plant tissue*. International Journal of Food Science and Technology. Vol.29. pp. 543-550.
- 54.Schwartz, M. (1994). *La deshidratación osmótica Como técnica de preconservación de frutas y hortalizas*. Aconex. Vol.44. pp. 10-13.
- 55.Schwartzberg, H. G. (1982). *Solute diffusivities in leaching process*. Food Technology.3. Vol.2. pp.73-86.
- 56.Senser & Sherz. (1991). *Tablas de composición de alimentos*. España. Acribia. p. 42.
- 57.Sharma, R.C., Joshi, V. K., Chauhan, S.K., Chopra S. K. & Lal, B.B (1991). *Application of osmosis-osmo-canning of apple rings*. Journal of Food Science and Technology. Vol. 28.pp. 86-88.
- 58.Sharman, S.K., Mulvaney, S.J., & Rizvi, S.S.H. (2003). *Ingeniería de alimentos, operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. México. Ed. Limusa Wiley.p.348.
- 59.SIAP (2010). Consultado en Agosto del 2015. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/wp-content/uploads/2013/12/Anuario2010.pdf>
- 60.Stone, H., & Sidel, J.L. (2004). *Sensory evaluation practices*. London. Ed. Academic Press. p.408.
- 61.Turatti, J. M., & Santos, L. C., (1985). *Caracterización del aceite de aguacate obtenido por diferentes procesos de extracción*. Italia. Vol. 22. pp. 267-284.
- 62.Unadi, A., Fuller, R.J., & Macmillan, R.H. (2002). *Strategies for drying tomatoes in a tunnel dehydrator*. Drying Tech. Vol.7. pp. 1407-1425.
- 63.Vakis, N., Gregorio, C. & Papademetriou, (1985). *Maturity and pickings datas of avocado under Cyprus condition*. California Avocado Soc. Yrb. Vol.45. p. 5.
- 64.White, J. (1995). *Conjugated diene, anisidine value and carbonyl value analyses*. AOCS Press Illinois.
- 65.Yahia E. M.,Higuera C.I.(1992). *Fisiología y tecnología postcosecha de productos hortícolas*. Mexico, D.F. Primera edicion.Ed. Limusa. p.95.

66. Yañez, T. (2009). *Alimentos no convencionales a base de aguacate: puré y dulce de aguacate*. Tesis de Licenciatura Fac. de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
67. Zogzas. (1996) *Moisture diffusivity data compilation in foods to drying technology*. Departamento de ingeniería química .Universidad Tecnológica.14. Vol.10. pp. 2225-2253.
68. Zamora R.T. (2009). *Extracción y caracterización del aceite de la pulpa de aguacate tipo Hass (Persea americana Mill)*, Tesis de Licenciatura Fac. de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ANEXO A



Universidad Nacional Autónoma de México.
Facultad de Química.



Prueba sensorial de las tiras de pulpa de aguacate variedad

Hass deshidratadas

Género: (F) (M)

Edad: _____

Fecha: _____

Cuestionario parte 1

Instrucciones: Por favor conteste las siguientes preguntas, marcando la opción preferida.

¿Consumes aguacate fresco?

Si	No
----	----

¿Consumes alimentos deshidratados?

Si	No
----	----

¿Consumiría tiras de pulpa de aguacate deshidratados?

Si	No
----	----

Cuestionario parte 2

Instrucciones: Pruebe las muestras que tiene frente a usted, e indique marcando con una X sobre la escala su nivel de agrado.

Escala hedónica	Muestra						
	322	970	269	512	469	871	443
Disgusta extremadamente							
Disgusta mucho							
Disgusta moderadamente							
Disgusta ligeramente							
Ni disgusta ni gusta							
Gusta ligeramente							
Gusta moderadamente							
Gusta mucho							

Comentarios: _____

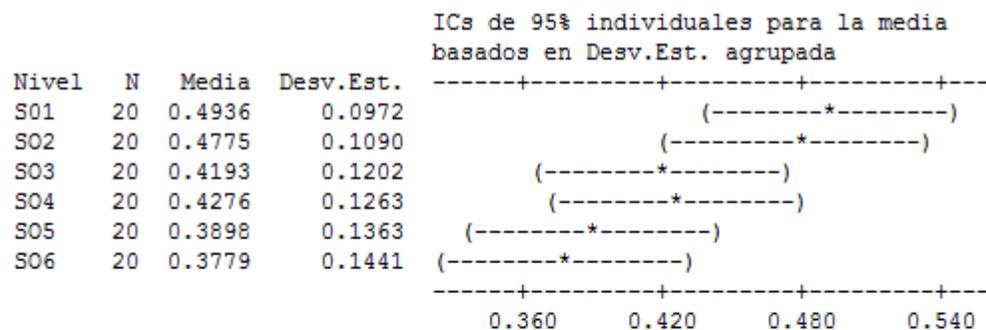
¡Gracias por su participación!

ANEXO B

Humedad base húmeda

ANOVA : SO1, SO2, SO3, SO4, SO5, SO6

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Factor	5	0.2150	0.0430	2.83	0.019
Error	114	1.7306	0.0152		
Total	119	1.9456			



Desv.Est. agrupada = 0.1232

Agrupar información utilizando el método de Tukey

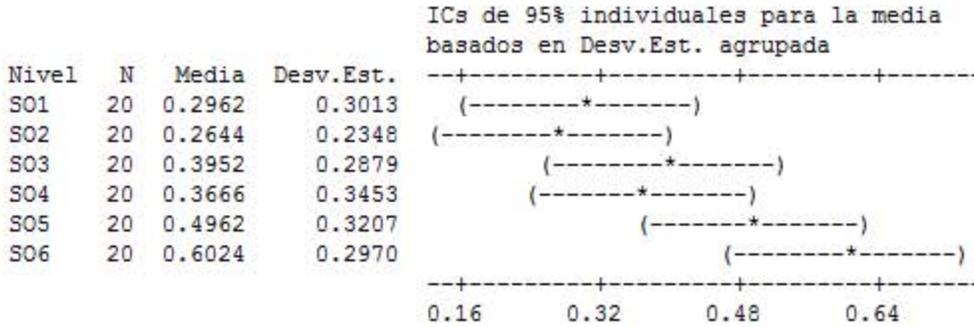
	N	Media	Agrupación
S01	20	0.4936	A
S02	20	0.4775	A B
S04	20	0.4276	A B
S03	20	0.4193	A B
S05	20	0.3898	A B
S06	20	0.3779	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

WL

ANOVA: SO1, SO2, SO3, SO4, SO5, SO6

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Factor	5	1.6087	0.3217	3.58	0.005
Error	114	10.2420	0.0898		
Total	119	11.8507			



Desv.Est. agrupada = 0.2997

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
SO6	20	0.6024	A
SO5	20	0.4962	A B
SO3	20	0.3952	A B
SO4	20	0.3666	A B
SO1	20	0.2962	B
SO2	20	0.2644	B

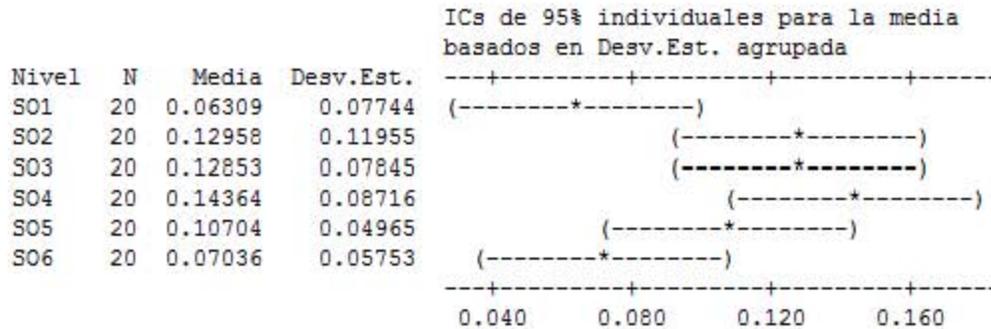
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

SG

ANOVA : SO1, SO2, SO3, SO4, SO5, SO6

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Factor	5	0.11173	0.02235	3.37	0.007
Error	114	0.75646	0.00664		
Total	119	0.86819			



Desv.Est. agrupada = 0.08146

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
SO4	20	0.14364	A
SO2	20	0.12958	A B
SO3	20	0.12853	A B
SO5	20	0.10704	A B
SO6	20	0.07036	A B
SO1	20	0.06309	B

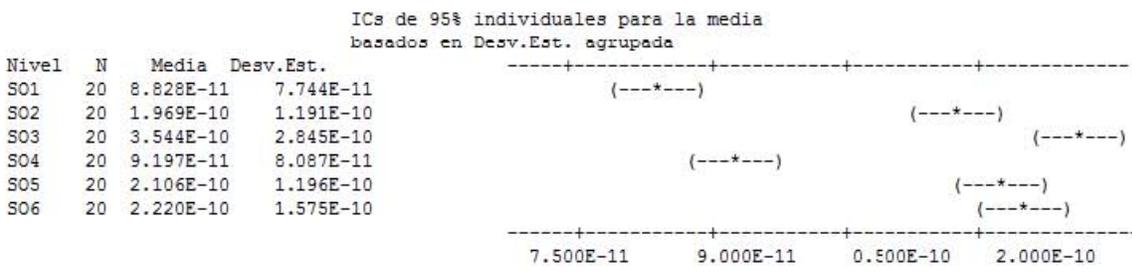
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Dew

ANOVA : SO1, SO2, SO3, SO4, SO5, SO6

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Factor	5	1.639E-10	1.437E-10	2.57	0.081
Error	114	9.921E-11	9.386E-11		
Total	119	2.631E-10			



Desv.Est. agrupada = 1.397E-10

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
SO3	20	3.544E-10	A
SO6	20	2.220E-10	A B
SO5	20	2.106E-10	A B
SO2	20	1.969E-10	A
SO4	20	9.197E-11	A
SO1	20	8.828E-11	A

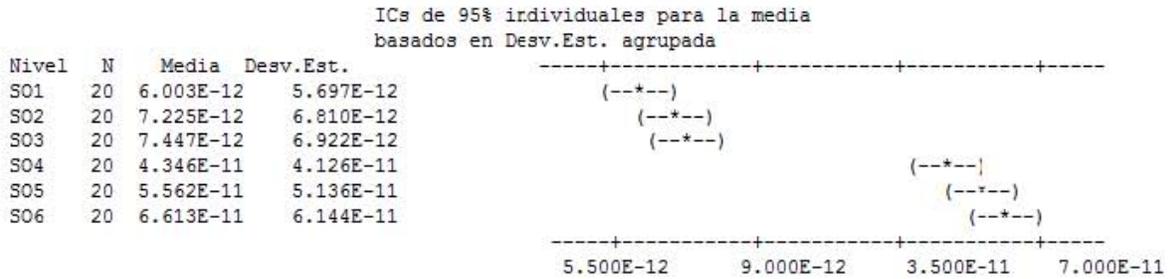
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Des

ANOVA : SO1, SO2, SO3, SO4, SO5, SO6

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Factor	5	5.379E-11	5.093E-11	3.58	0.005
Error	114	6.271E-12	6.002E-12		
Total	119	6.006E-11			



Desv.Est. agrupada = 2.891E-11

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
SO6	20	6.144E-11	A B
SO5	20	5.136E-11	A B
SO4	20	4.346E-11	A
SO3	20	7.447E-12	A B
SO2	20	7.225E-12	A B
SO1	20	6.003E-12	A

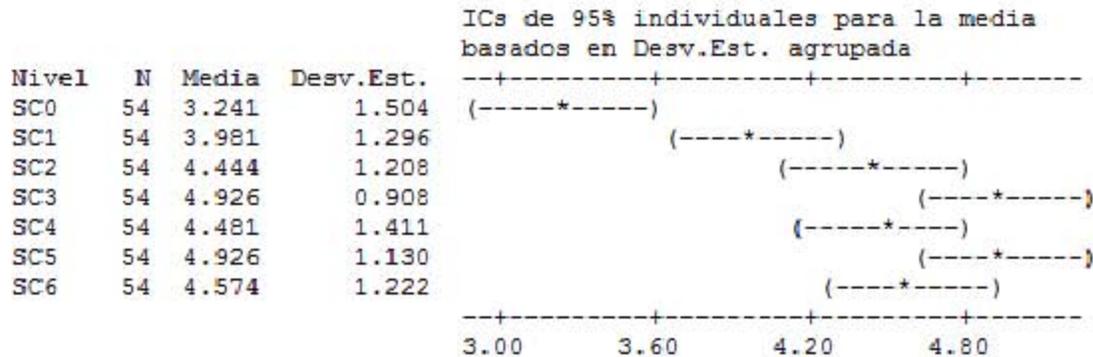
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

EVALUACIÓN SENSORIAL

ANOVA de dos factores: RPH vs. Tratamiento, Jueces

Fuente	GL	SC	CM	F	F (tab)	P
Tratamiento	6	113.608	18.9347	21.79	2.144	0.000
Jueces	53	305.886	5.7714	6.64	1.415	0.000
Error	318	276.392	0.8692			
Total	377	695.886				



Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tratamientos	N	Media	Agrupación
SC5	54	4.926	A
SC3	54	4.926	A
SC6	54	4.574	A B
SC4	54	4.481	A B
SC2	54	4.444	A B
SC1	54	3.981	B
SC0	54	3.241	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de Tratamientos