



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Modelado de la velocidad de respiración e índice de  
oscurecimiento de una ensalada de manzana-pera envasada en  
atmósferas modificadas**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A**

**EDNA JIMÉNEZ MORLÁN**

**ASESORES:**

**Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza**

**I.A. Alfredo Álvarez Cárdenas**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

U.N.A.M.  
ASUNTO: VOTO APROBATORIO  
SUPERIORES CUAUTITLÁN



ATN: L.A. ARACELI HERREJA HERNÁNDEZ  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.  
EXÁMENES PROFESIONALES

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos el: Tesis

Modelado de la velocidad de respiración e índice de oscurecimiento de una ensalada de manzana-pera envasada en atmósfera modificadas

Que presenta la pasante: Edna Jiménez Morlán  
Con número de cuenta: 408092344 para obtener el Título de: Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 23 de Abril de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. José Francisco Montiel Sosa	
VOCAL	IA. Manuel Alarcón López	
SECRETARIO	Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza	
1er. SUPLENTE	M. en C. Tais Nopal Guerrero	
2do. SUPLENTE	IA. María Guadalupe López Franco	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HHA/pm

Este trabajo fue financiado con el apoyo del proyecto PAPIME PE203711 “Fortalecer el área de procesos y sistemas frigoríficos con atmósferas modificadas”, de la Dirección General de Asuntos de Personal Académico de la UNAM.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen de San Juan de los Lagos, sobre todo por brindarme la paciencia para poder sacar adelante este proyecto.

A mis padres: Jesús y Lulú. Este trabajo también es de ustedes, ya que sin su apoyo a lo largo de mi vida no habría llegado hasta el punto en el que me encuentro ahora. Por esto y más: gracias. Los amo.

A Cintia y Katia, quienes directa o indirectamente estuvieron ahí para brindarme su ayuda. Las quiero hermanas.

A mi tía Lulú Jiménez. Siempre has estado en las buenas y las malas, no solo conmigo, sino para toda mi familia, actuando como una segunda madre. Gracias por todo.

A la Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza y al I.A. Alfredo Álvarez Cárdenas, por sus enseñanzas, consejos y paciencia, e incluso por su comprensión en uno de los momentos más difíciles de mi vida.

A Rodrigo Juárez, Araceli Castro, Christian López, Delbert Mendoza, Ericka Jiménez, Susana Medina, Héctor Rosales, por haberme ayudado durante el proceso de envasado, no podría haberlo hecho sola, les estoy agradecida.

A Penélope Casarubias, por tus consejos, enseñanzas y sobre todo por tu tiempo. Gracias amiga.

Al Dr. David Quintanar Guerrero, por el apoyo brindado mediante el préstamo de equipo de laboratorio en la realización de pruebas relacionadas a este proyecto.

Finalmente, y no por ello menos importante, a la Universidad Nacional Autónoma de México y a su vez a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, *alma mater* de mi formación profesional. A todos mis profesores y mentores, quienes compartieron sus conocimientos, experiencia y anécdotas, contagiándome el amor a esta hermosa carrera que es Ingeniería en Alimentos.

*Edna Jiménez Morlán*

## **DEDICATORIA**

Con amor a mis abuelos: Tita, Aurelio, Conchita y Gabriel, como muestra de sus enseñanzas donde el trabajo duro y constante brinda frutos ricos y dulces. En mi corazón estarán siempre.

*“Por mi raza hablará el espíritu”*

José Vasconcelos

# ÍNDICE

RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	i
CAPÍTULO 1. Marco teórico	1
1.1 Generalidades de la manzana y pera	1
1.1.1 Descripción física y estructural	1
1.1.2 Respiración	4
1.2 Frutas frescas cortadas	5
1.2.1 Definición de frutas frescas cortadas	6
1.2.2 Procesado de frutas frescas cortadas	7
1.2.3 Impacto fisiológico del procesado de frutas frescas cortadas	11
1.2.4 Oscurecimiento enzimático	12
1.2.4.1 Control del oscurecimiento enzimático	14
1.2.4.2 Evaluación del oscurecimiento enzimático	15
1.3 Envasado en atmósferas modificadas	16
1.3.1 Definición del envasado en atmósferas modificadas	16
1.3.2 Generación de una atmósfera modificada	17
1.3.3 Gases utilizados en las atmósferas modificadas	20
1.3.4 Materiales para el envasado en atmósferas modificadas	22
1.3.5 Ventajas y desventajas del envasado en atmósferas modificadas	24
1.3.6 Efecto de la atmósfera modificada en la velocidad de respiración	25
1.3.7 Métodos experimentales para medir la velocidad de respiración	26
1.4 Modelado de atmósferas modificadas	29
1.4.1 Finalidad del modelado de atmósferas modificadas	29
1.4.2 Niveles en el modelado de atmósferas modificadas	30

1.4.3 Parámetros que influyen en el modelado de atmósferas modificadas	31
1.4.3.1 Influencia de la composición de gases	32
1.4.3.2 Influencia de la temperatura	34
1.4.4 Modelado de la transferencia de gases en el envasado en atmósferas modificadas	34
CAPÍTULO 2. Metodología de investigación experimental	36
2.1 Problema y objetivos	36
2.2 Selección y justificación de variables	37
2.3 Diseño experimental	38
2.3.1 Acondicionamiento de la cámara de almacenamiento refrigerado	38
2.3.2 Selección y control de la materia prima	39
2.3.2.1 Tamaño	39
2.3.2.2 Contenido de sólidos solubles	39
2.3.3 Elaboración de la ensalada de manzana-pera	40
2.3.4 Envasado en atmósferas modificadas	40
2.3.5 Monitoreo del cambio de la concentración de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> al interior del envase	42
2.3.6 Determinación del color	43
2.3.7 Cinética de oscurecimiento	44
2.3.8 Velocidad de respiración	45
2.3.9 Modelado de la velocidad de respiración	45
2.4 Tratamiento estadístico	47
CAPÍTULO 3. Análisis de resultados y discusión	48
3.1 Cambios en el color	48
3.1.1 Parámetros de color L*, a* y b*	48
3.1.2 Índices de oscurecimiento	52
3.2 Cinética de oscurecimiento	58

3.3 Velocidad de respiración	61
3.3.1 Sistema permeable	61
3.3.2 Sistema estático	64
3.4 Modelado de la velocidad de respiración	67
3.5 Verificación del modelo	71
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Manzana variedad Gala y pera variedad Anjou	2
Figura 2.	Esquema general de la respiración aerobia.	4
Figura 3.	Esquema general de la preparación de frutas frescas cortadas	8
Figura 4.	Reacciones (a) hidroxilación y (b) oxidación, catalizadas por las PPOs	13
Figura 5.	Difusión de gases en envases que contienen frutas frescas	20
Figura 6.	Ensalada de manzana-pera envasada en atmósferas modificadas	42
Figura 7.	Analizador de O <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> Quantex Instruments 905	42
Figura 8.	Espectrofotómetro de mesa Kónica Minolta CM-5	43
Figura 9.	Cambio de la luminosidad (L*) de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento	48
Figura 10.	Cambio del parámetro a* de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento	50
Figura 11.	Cambio del parámetro b* de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento	52
Figura 12.	Cambio del índice de oscurecimiento (IO) de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento	53
Figura 13.	Probabilidad normal de los efectos estandarizados del IO de la pera a las 96 h de almacenamiento	55
Figura 14.	Manzana y pera frescas cortadas con diferentes tratamientos a las 96 h de almacenamiento	55
Figura 15.	Cambio en el ángulo Hue (h <sub>ab</sub> *) de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento	56
Figura 16.	Cambio del Croma (C*) de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento	57
Figura 17.	Efectos principales sobre la constante de velocidad de reacción (k) en la cinética de oscurecimiento de las rebanadas de pera	59

Figura 18.	Efectos principales sobre la constante de velocidad de reacción (k) en la cinética de oscurecimiento de las rebanadas de manzana	60
Figura 19.	Incremento de la presión parcial de O <sub>2</sub> al interior del envase	61
Figura 20.	Disminución de la presión parcial de CO <sub>2</sub> al interior del envase	62
Figura 21.	Variación de la presión parcial de oxígeno al interior del envase, sistema estático	64
Figura 22.	Variación de la presión parcial de dióxido de carbono al interior del envase, sistema estático	65
Figura 23	Efectos principales sobre la constante de velocidad de reacción (k) en la producción de dióxido de carbono	68
Figura 24	Gráfica tipo Arrhenius para la estimación de la energía de activación	69
Figura 25	Variación de la velocidad de producción de CO <sub>2</sub> experimental y calculada	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición química por cada 100 g de manzana y pera cruda comestible	3
Tabla 2.	Diferentes presentaciones de frutas frescas cortadas	7
Tabla 3.	Condiciones requeridas de atmósfera modificada de algunas frutas frescas cortadas	22
Tabla 4.	Características deseables de los materiales empleados en el EAM	23
Tabla 5.	Selección de variables	38
Tabla 6.	Mezclas de gases utilizadas en el envasado en atmósferas modificadas	41
Tabla 7.	Ajuste cinético de orden cero del parámetro de color a*	58
Tabla 8.	Velocidad de respiración, sistema permeable	63
Tabla 9.	Velocidad de respiración, sistema estático	66
Tabla 10	Constante de velocidad de reacción (k) en el modelo de la velocidad de producción de CO <sub>2</sub>	68

## NOMENCLATURA

$a^*$	Coordenada cromática (rojo-verde)
$a_0^*$	Coordenada cromática (rojo-verde) inicial
$A$	Área total de la superficie de la película del envase, $m^2$
$b^*$	Coordenada cromática (amarillo-azul)
$E_a$	Energía de activación aparente, $kJ\ mol^{-1}$
ERP	Error relativo promedio, %
$F$	Flujo de gases, $m^3\ h^{-1}$
IO	Índice de oscurecimiento, %
$k$	Constante de velocidad de reacción, $h^{-1}$
$K_i$	Constante de inhibición, % $CO_2$
$K_m$	Concentración de $O_2$ que corresponde a la mitad de $R_{O_2}^{max}$ , % $O_2$
$L$	Espesor del envase, $m$
$L^*$	Luminosidad
LIO	Límite inferior de oxígeno, %
$M$	Masa del producto, $kg$
$n$	Orden de reacción
$N$	Número de predicciones
PPOs	Polifenol oxidasas
$p_{CO_2, O_2}^{int}$	Presión parcial de $CO_2/O_2$ dentro del envase, atm
$p_{CO_2, O_2}^{ext}$	Presión parcial de $CO_2/O_2$ fuera del envase, atm
$P_{CO_2, O_2}$	Permeabilidad del envase al $CO_2$ y $O_2$ , $m^3\ m\ m^{-2}\ h^{-1}\ atm^{-1}$
$R$	Constante de los gases ideales, $8.314\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$
$R_{CO_2}$	Velocidad de consumo de dióxido de carbono, $m^3\ kg^{-1}\ h^{-1}$
$R_{O_2}$	Velocidad de consumo de oxígeno, $m^3\ kg^{-1}\ h^{-1}$
$R_{O_2}^{max}$	Velocidad máxima de consumo de oxígeno, $m^3\ kg^{-1}\ h^{-1}$
RQ	Coefficiente de respiración
$t_{i,f}$	Tiempo inicial o final, $h$

T	Temperatura , °C o K
V	Volumen del recipiente, m <sup>3</sup>
V <sub>f</sub>	Volumen libre o espacio libre de cabeza al interior del envase, m <sup>3</sup>
X	Factor de cromacidad
X <sub>i</sub>	Valor observado en la experimentación
Y <sub>i</sub>	Valor calculado utilizando el modelo obtenido
y <sub>CO<sub>2</sub>,O<sub>2</sub></sub>	Concentración de CO <sub>2</sub> u O <sub>2</sub> en la mezcla de gases inicial, % v/v
y <sub>CO<sub>2</sub>,O<sub>2</sub></sub> <sup>en</sup>	Concentración volumétrica de CO <sub>2</sub> u O <sub>2</sub> que entra al envase, % v/v
y <sub>CO<sub>2</sub></sub> <sup>ext</sup>	Concentración volumétrica externa de CO <sub>2</sub> , % v/v
y <sub>CO<sub>2</sub>,O<sub>2</sub></sub> <sup>int</sup>	Concentración de CO <sub>2</sub> u O <sub>2</sub> dentro del envase, % v/v
y <sub>CO<sub>2</sub>,O<sub>2</sub></sub> <sup>sal</sup>	Concentración volumétrica de CO <sub>2</sub> u O <sub>2</sub> que sale del envase , % v/v
y <sub>CO<sub>2</sub>,O<sub>2</sub></sub> <sup>t<sub>i</sub></sup>	Concentración volumétrica de CO <sub>2</sub> u O <sub>2</sub> inicial, % v/v
y <sub>CO<sub>2</sub>,O<sub>2</sub></sub> <sup>t<sub>f</sub></sup>	Concentración volumétrica de CO <sub>2</sub> u O <sub>2</sub> final, % v/v
α	Orden de reacción con respecto al O <sub>2</sub>
β	Orden de reacción con respecto al CO <sub>2</sub>
δ	Factor pre-exponencial
ρ	Densidad aparente del producto, kg m <sup>-3</sup>

## RESUMEN

El empleo de atmósferas modificadas (AM) mantiene la calidad de los frutos frescos cortados al generar un microclima en el espacio libre del envase que limita el intercambio gaseoso, modificando la presión parcial del  $O_2$  y  $CO_2$  hasta niveles que minimiza los procesos fisiológicos y de deterioro. Sin embargo, una mala selección del envase, así como una inadecuada concentración de gases, pueden ser perjudiciales. Razón por lo que en esta investigación se consideró un modelo empírico de los componentes de un sistema estático basado en la teoría de cinética química involucrando la temperatura y la modificación de la atmósfera en el espacio libre de cabeza al interior del envase para desarrollar un modelo de la velocidad de respiración de una ensalada de manzana-pera envasada en atmósferas modificadas.

El uso de envases de media barrera presentó alta permeabilidad al  $CO_2$  y al  $O_2$ , por lo que el modelo se realizó utilizando los envases de alta barrera con la finalidad de establecer las condiciones de equilibrio que permitieran considerar la respiración de la mezcla de frutos para modelar en base a un sistema estático y en términos de la teoría de cinética química. Por otro lado, se determinó el orden de reacción así como la constante de velocidad de reacción a tres diferentes temperaturas para posteriormente obtener la energía de activación en base a un modelo tipo Arrhenius. El modelo, que involucró las constantes mencionadas, resultó ser aceptable en términos del error relativo promedio.

Conjuntamente se determinaron los parámetros de color  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  para posteriormente estimar los índices de oscurecimiento así como la cinética de oscurecimiento de las rebanadas de manzana y pera envasadas en atmósferas modificadas.

## INTRODUCCIÓN

Los alimentos se deterioran debido a factores físicos, químicos y microbiológicos; por lo que, la vida útil de productos perecederos como diferentes tipos de carnes, productos hortofrutícolas y de panificación, se encuentra limitada en presencia de aire, la temperatura y la humedad del ambiente (Guevara, 2010). La influencia de estos factores es mayor cuando se trata de productos frescos cortados.

Las frutas frescas cortadas (o mínimamente procesadas) refrigeradas son productos seleccionados, lavados, cortados y envasados que se conservan bajo una cadena de frío, tratándose de alimentos frescos y listos para ser consumidos. Las frutas frescas cortadas son tejidos vivientes que respiran y están relacionadas con un estrés debido al daño mecánico ocasionado por su procesamiento, reflejándose en un incremento de su velocidad de respiración (Rojas-Graü, *et al.*, 2009). El oscurecimiento enzimático se considera uno de los problemas más importantes relacionados con el deterioro de fruta fresca cortada (Soliva-Fortuny y Martín-Belloso, 2003), siendo las peras y manzanas productos muy sensibles a este fenómeno.

La demanda de frutas frescas cortadas, individual o en ensalada, listas para consumir, se ha manifestado en el desarrollo del envasado en atmósferas modificadas (EAM) como una forma de extender la vida útil y conservar la calidad del producto. El EAM se ha utilizado ampliamente como un método de conservación que afecta mínimamente las características del alimento, pues la atmósfera seleccionada contribuye a modificar la velocidad de respiración del producto (Martínez-Ferrer, *et al.*, 2002).

La velocidad de respiración y el intercambio de gases a través del material de envase son procesos involucrados en el desarrollo de una atmósfera modificada, por lo que el modelado de la velocidad de respiración de un producto es crucial para el diseño de un sistema de EAM exitoso (Fonseca, *et al.*, 2002).

El diseño de EAM es una tarea compleja que requiere el entendimiento de las interacciones dinámicas establecidas entre el producto, la atmósfera generada dentro del envase y el mismo envase. El modelado del envasado en atmósferas modificadas es útil en el diseño de EAM pues puede predecir el fenómeno de transferencia de masa que ocurre entre el producto, el sistema de envasado y el ambiente, y ayudar en el diseño de la geometría del envase (Zhang, *et al.*, 2011).

La mayoría de los estudios en frutas frescas cortadas se han enfocado en la influencia y relación de la temperatura y las concentraciones de los gases sobre los cambios en la cinética de respiración para modelar los cambios asociados a la manipulación durante su transporte y distribución (Gomes, *et al.*, 2010).

Gran parte de estos modelos se han desarrollado en base al principio de cinética enzimática; de esta forma Torrieri, *et al.* (2009) modelaron la influencia de la concentración de oxígeno utilizando el modelo de Michaelis-Menten, para posteriormente obtener energías de activación como función de la temperatura mediante la ecuación de Arrhenius. Rocculi, *et al.* (2006) mediante el mismo modelo, describieron los cambios en la respiración de manzana mínimamente procesada; mientras que Lakakul, *et al.*, (1999) desarrollaron un modelo de la respiración en respuesta al oxígeno y temperatura, y a la permeación al oxígeno a través de varias películas, combinándolos para diseñar el EAM.

Por otro lado, también se ha utilizado la teoría de cinética química para desarrollar modelos de la influencia de la temperatura y la concentración de gases para la conservación de frutas frescas (Duan, *et al.*; Wang, *et al.*, 2009) demostrando ser igual de útiles que aquellos basados en la cinética enzimática.

Únicamente se han reportado modelos de la velocidad de respiración de frutas frescas individuales y existen pocos modelos para fruta fresca cortada, por lo que es necesario desarrollar modelos aplicados a fruta fresca cortada en ensalada, ya que en una mezcla

se presenta una velocidad de respiración diferente de cada uno de sus componentes, lo que a su vez dificulta el diseño del envasado en atmósferas modificadas del producto.

Debido a lo anterior, esta investigación se enfocó a relacionar la influencia de la atmósfera y la temperatura de almacenamiento refrigerado, considerando la masa del producto con la velocidad de producción de dióxido de carbono para obtener un modelo del comportamiento de la respiración de una ensalada de manzana-pera envasada en atmósferas modificadas basado en la teoría de cinética química, así como el índice de oscurecimiento para determinar la cinética de degradación de la calidad del producto.

# CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 GENERALIDADES DE LA MANZANA Y PERA

Las frutas de pomo más importantes en función a su comercialización son la manzana y la pera, las cuales se cultivan en la mayor parte de las regiones templadas del mundo. Por lo general las manzanas y las peras se cultivan para el consumo directo y por lo tanto se clasifican al ser recolectadas. Los criterios de selección para la industria son el grado de madurez, la acidez y la riqueza en sólidos solubles (Arthey y Ashurst, 1997).

### 1.1.1 Descripción física y estructural

La manzana (*Pyrus malus* L.) es una fruta climatérica, es una especie de fruta dulce difundida mundialmente a gran escala debido a su fácil adaptación a diferentes climas y suelos, su valor alimenticio y la diversidad de sus productos derivados. Es la fruta por excelencia pues es bien tolerada por la mayoría de las personas y se combina fácilmente con cualquier otro alimento. Suele consumirse cruda como fruta de mesa o como ingredientes de ensaladas ya que al ser cortadas en rodajas o picadas aportan una textura fresca y crujiente. En México la producción de manzana se concentra principalmente en las variedades Golden Delicious, Red Delicious, Gala y Starkinson, y en menor escala Rome Beauty y Anna (SAGARPA, 2005).

Particularmente, la manzana de la variedad Gala se distingue debido a las rayas rosanaranjadas sobre un fondo amarillo y su dulce aroma. Sus usos principales son en bocadillos y ensaladas. La cosecha de las manzanas Gala comienza a mediados de agosto y dura hasta principios de septiembre. Las manzanas Gala están disponibles de septiembre a mayo (Washington Apples Comission, 2011).

Por otro lado, la pera (*Pyrus communis* L.) también es un pomo con forma redondeada o de lágrima, su pulpa es blanca, finamente granulada y un corazón central que contiene

cinco celdillas con 1-2 semillas, aunque hay variedades que no las tienen (Infoagro, 2010). Es una fruta que se desarrolla en climas templados y algo húmedos, siendo más resistente al frío que al calor. Entre las principales variedades comerciales se pueden mencionar la D'Anjou, Barlett, Bosc, Seckel, Kieffer, entre otras; en México, las principales variedades cultivadas son: Paraiso, Kieffer y Lechera.

Las Anjou se reconocen por su apariencia en forma de huevo: con la parte más baja de forma esférica que se afina en la parte media para terminar con la parte superior redondeada y más pequeña. Su piel es color verde brillante y en algunas ocasiones tiene un ligero rubor rojizo. La cosecha de las peras Anjou comienza en el otoño, siendo la variedad con mayor disponibilidad durante el verano (Peras USA, 2011).



Figura 1. Manzana variedad Gala y pera variedad Anjou.

En promedio, la manzana está formada por 85 % agua, 12 – 14 % carbohidratos, y aproximadamente 0.3 % proteína. La variación de estos componentes dependerá de las diferencias en el tipo de suelo donde es cultivada, la variedad, la madurez de la cosecha, condiciones agronómicas y ambientales (Sinha, 2006). La pera presenta gran similitud con la manzana, contiene aproximadamente 16 % de carbohidratos y cantidades insignificantes de grasas y proteínas. Es buena fuente de vitaminas del complejo B y también contiene vitamina C. En la tabla 1 se presenta la composición química de manzana y pera crudas frescas por cada 100 g de producto comestible.

Tabla 1. Composición química por cada 100 g de manzana y pera cruda comestible.  
(FAO, 2002)

<b>Componente</b>	<b>Manzana</b>	<b>Pera</b>
Agua (g)	85.1	83.1
Proteínas (g)	0.3	0.5
Grasas (g)	0.3	0.4
Cenizas (g)	0.3	0.3
Carbohidratos totales (g)	14.0	15.7
Energía (kcal)	60	68
Colesterol (mg)	0	0
Tiamina (mg)	0.02	0.02
Niacina (mg)	0.2	0.1
Sodio (mg)	0	0
Potasio (mg)	113	125
Calcio (mg)	7.0	9.0
Fósforo (mg)	7.0	11.0
Hierro (mg)	0.7	0.2
Zinc (mg)	0	0.12
Vitamina A Equiv. Totales (µg)	10.0	1.0
Riboflavina (mg)	0.01	0.04
Vitamina C (mg)	11.0	4.0

Aproximadamente el 80 % de los carbohidratos presentes son azúcares solubles: sacarosa (aproximadamente 2.0 %), glucosa (2.4 %) y fructosa (6.0 %). El ácido málico es el principal ácido orgánico presente en estas frutas (0.3 – 1.0 %), y la cantidad en la que se encuentra en función a la variedad, madurez y condiciones ambientales.

Los cambios de madurez tanto en las manzanas como en peras incluyen: color de la piel, color de las semillas, tamaño, firmeza de la pulpa (textura), contenido de sólidos solubles, contenido de almidón, contenido de acidez titulable, tasa de respiración, producción de etileno, y producción de otros constituyentes de olor y aroma (Kader, 2011). El consumo de estos frutos requiere cierto grado de madurez, por lo que para verificar los requisitos mínimos de madurez se pueden considerar los parámetros antes mencionados, resaltando los aspectos morfológicos, firmeza y contenido de sólidos solubles. Se pueden clasificar según su coloración y calibre (CODEX STAN 299, 2010).

### 1.1.2 Respiración

Las frutas se encuentran vivas cuando están unidas a la planta de la que proceden y tras la recolección continúan respirando al consumir  $O_2$ , y produciendo  $CO_2$  y calor, igualmente transpiran y producen etileno.

La respiración es un proceso metabólico que provee la energía para los procesos bioquímicos de la planta. La respiración aerobia consiste en la oxidación de las reservas orgánicas a otras células más simples, formando  $CO_2$  y agua, con liberación de energía. Los sustratos orgánicos que pueden intervenir en este proceso son los carbohidratos, lípidos y ácidos orgánicos, los cuales son transformados en moléculas más simples para proveer las demandas energéticas que requiera la fruta para su actividad metabólica. El proceso, como se muestra en la figura 2, requiere de  $O_2$  en una serie de reacciones enzimáticas donde la glucólisis, el ciclo de Krebs, o ciclo de los ácidos tricarbóxicos, y el sistema de la cadena de transporte de electrones son las rutas metabólicas de la respiración aerobia (Fonseca, *et al.*, 2002).

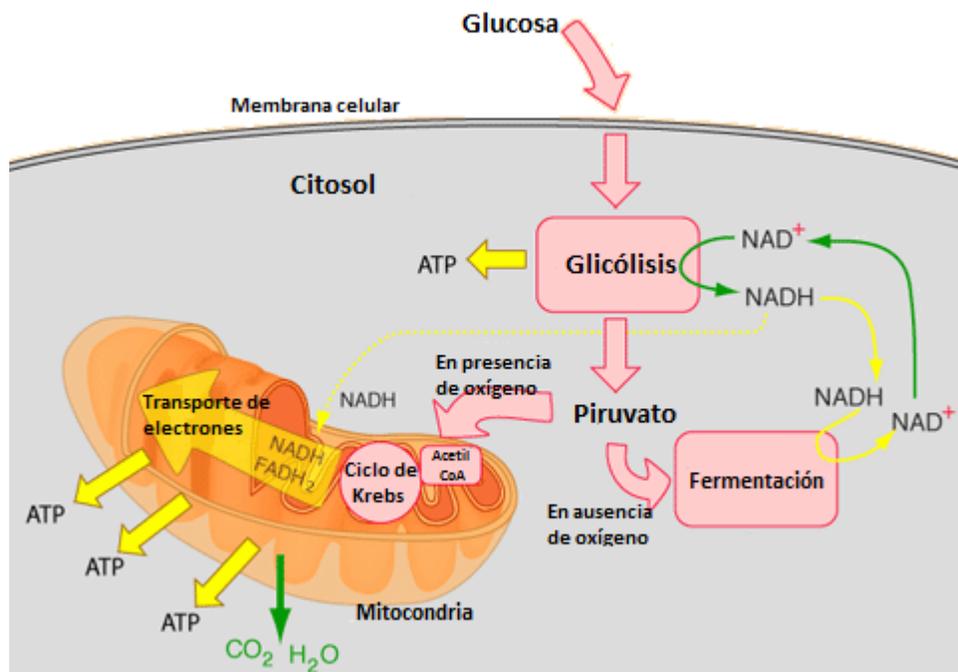


Figura 2. Esquema general de la respiración aerobia.  
(Adaptado de: Nave, 2013).

Químicamente puede ser expresada de la siguiente manera:



La respiración aerobia requiere de  $\text{O}_2$  y utiliza la materia orgánica de los tejidos del fruto; el incremento de la concentración de este gas es proporcional al incremento de la respiración, lo cual resulta en cambios en la composición y nutrientes del fruto (Zhuang, *et al.*, 2011). Un producto de la respiración aerobia es el  $\text{CO}_2$ , y altos niveles de éste inhibe la respiración del tejido. La relación entre el  $\text{CO}_2$  producido y el  $\text{O}_2$  consumido se le conoce como coeficiente de respiración (RQ) (Fonseca, *et al.*, 2002).

Cuando el tejido de una planta ha alcanzado la madurez su tasa de respiración debe permanecer constante o descender lentamente hasta alcanzar la senescencia. Según el patrón respiratorio que siguen las últimas fases de la maduración, los frutos pueden clasificarse como climatéricos o no climatéricos (Barceló, *et al.*, 2001).

Los frutos climatéricos acumulan almidón durante su crecimiento, hidrolizándolo a glucosa y fructosa durante la maduración. Esta etapa se caracteriza por el aumento de la respiración y tienen la propiedad de poder madurar después de la recolección. Por el contrario, los no climatéricos acumulan directamente monosacáridos durante su crecimiento, por lo que en la maduración no experimentan incrementos significativos en su tasa respiratoria, éstos no pueden madurar si no permanecen en la planta madre (Côme y Corbinau, 2001). En este sentido, la manzana y pera pertenecen a la primera clasificación.

## 1.2 FRUTAS FRESCAS CORTADAS

Los métodos y las tecnologías de conservación que incluyen tratamientos térmicos afectan la apariencia, características sensoriales y valor nutricional de los alimentos, por lo que las técnicas de procesado mínimo han sido ampliamente utilizadas para contrarrestar este problema. Estas sirven para la lograr la conservación de los alimentos,

manteniendo su calidad nutricional y sensorial al reducir la dependencia al calor como principal agente de conservación (Balla y Farkas, 2006).

Las frutas y hortalizas frescas cortadas, también conocidas como “mínimamente procesadas”, “ligeramente procesadas”, “listas para consumir” o “IV Gama”, constituyen una clase de productos que se está desarrollando de forma rápida e importante. En este contexto, las frutas frescas cortadas aparecen en el mercado como respuesta de la tendencia del consumidor a productos de conveniencia, frescos, nutritivos, de alta calidad e inoctrinos (James y Ngarmsak, 2010). Por lo tanto, estos productos requieren de nuevas técnicas de preservación para mantener la inocuidad y calidad del mismo, y que proporcione el tiempo suficiente para hacer la distribución más viable y factible (Martín, *et al.*, 2006).

### **1.2.1 Definición de frutas frescas cortadas**

Las frutas frescas cortadas son aquellas preparadas mediante una o varias operaciones unitarias como un tratamiento de conservación no definitivo, que normalmente se acompaña con alguna forma de atmósfera controlada, modificada o envasado al vacío, en conjunto con bajas temperaturas por encima del punto de congelación (Wiley, 1997).

Las frutas frescas cortadas son productos listos para consumir caracterizados por su fácil e inmediata utilización, pues poseen un estado óptimo de madurez y características muy similares a la materia fresca, lo que las convierte en productos de conveniencia y con las propiedades nutricionales buscadas por el consumidor final. Actualmente en el mercado se pueden encontrar diferentes tipos de frutas frescas cortadas en diferentes presentaciones, tanto en su forma individual como en mezcla, tal y como se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Diferentes presentaciones de frutas frescas cortadas.  
(Pérez, 2003)

Presentación	Frutas	Geometría	Peso (g)	Tipo de envase	Vida útil (días)	Punto de venta
Una sola fruta	Piña, melón, papaya	Cubos	650-680	Tarrinas	1	Supermercados: marcas blancas
	Naranja	Rodajas	120	Bandejas	1	Servicios de catering
	Arándanos, moras, grosellas, framboesas	Enteras	200-300	Tarrinas, bandejas	5	Supermercados: marcas blancas
	Pera, manzana, kiwi, mango, piña, papaya.	Rodajas, cubos, láminas	175	Tarrinas	5	Supermercados: marcas blancas
Mezclas	Manzana, piña, naranja, uvas, nectarina	Cubos, trapezoides, rectángulos	280	Tarrinas	8	Supermercados: marcas blancas y registradas

\*Días.

\*\*Temperatura de almacén y venta 0 a 5°C.

### 1.2.2 Procesado de frutas frescas cortadas

La elaboración de frutas frescas cortadas involucra el lavado, pelado, troceado o cortado en un tamaño y forma específico; puede incluir diferentes tratamientos químicos y físicos pudiendo presentar sinergismo entre ellos. Finalmente un punto importante en la conservación de frutas frescas cortadas es el envasado, ya que en gran medida de ello dependerá la vida útil del producto. Una opción es el envasado en atmósferas

modificadas y refrigeradas de 2-4 °C (Martín, *et al.*, 2006). En la figura 3 se presenta el esquema general de preparación de frutas frescas cortadas. En las operaciones de manipulación se incluyen todos los movimientos desde el campo hasta la venta del producto. Previo al procesamiento se debe tomar en cuenta la recolección, el preenfriamiento para eliminar el calor de campo, el transporte, la distribución y el almacenamiento de la materia prima.

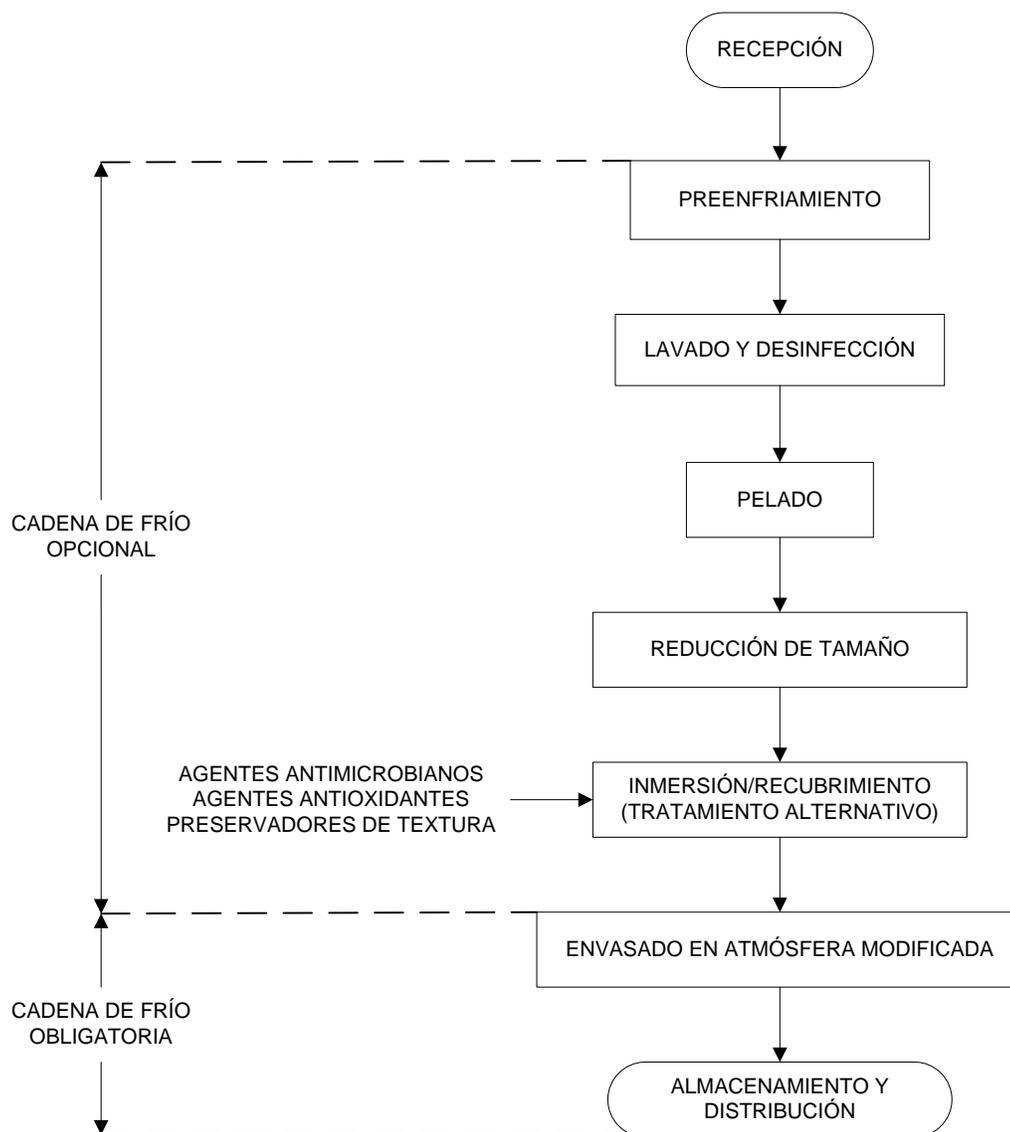


Figura 3. Esquema general de la preparación de frutas frescas cortadas.  
(Adaptado de Wiley, 1997, y James y Ngarmsak., 2010).

a) *Recepción*

El estado de madurez de las frutas previo a la preparación es un punto clave en la calidad de frutos frescos cortados. Es en este punto donde se rompe la cadena de frío, por lo que se debe evaluar y vigilar la materia prima para que ésta no pierda sus cualidades (Wiley, 1997).

b) *Almacenamiento refrigerado*

Después de ser recibido, el producto debe ser dirigido al área de almacenamiento refrigerado, cuyas condiciones dependen del tipo de fruta. Al hablar de frutos frescos cortados el enfriamiento previo a las operaciones de pelado y cortado permite ralentizar los procesos metabólicos y reducir el proceso de la senescencia y el desarrollo de daños y alteraciones (González Buesa, *et al.*, 2003). Al mantenerlos fríos se extiende la vida de anaquel del producto fresco cortado final. Se han utilizado ampliamente diferentes tecnologías, como el enfriamiento con aire forzado o enfriamiento al vacío (James y Ngarmsak, 2010).

c) *Lavado y desinfección*

En esta etapa se enfoca en reducir la carga microbiana en la superficie del fruto y evitar que ésta contamine tanto los utensilios de pelado y cortado como el interior del producto (González Buesa, *et al.*, 2003), que puede ser responsable de la pérdida de calidad y pudrición. De esta manera se evita un incremento en el consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono, lo que disminuiría considerablemente la vida útil del producto. La materia prima es sumergida en agua potable mientras se agregan agentes sanitizantes, por ejemplo cloro, peróxido de hidrógeno, ácido peroxiacético y ácidos orgánicos (James y Ngarmsak, 2010). Es importante monitorear la temperatura del agua, el tiempo de contacto, el pH y la concentración de sanitizante durante esta etapa.

d) *Pelado*

Se refiere a la eliminación de la piel de la fruta de forma manual o por medios mecánicos. En algunos casos se utilizan peladores automáticos con rodillos abrasivos.

e) *Reducción de tamaño*

La reducción de tamaño involucra el cortado de los frutos en un tamaño y forma específica, ya sea de forma manual o mecánica. Es importante que se minimicen los daños en las paredes celulares del fruto así como la posible contaminación microbiana, lo que depende directamente del tipo y precisión de los cortes realizados. Por ello los utensilios y equipos utilizados deben estar correctamente afilados y desinfectados. El equipo de reducción de tamaño consta de trituradoras o cortadoras para picado, corte en rodajas o cubos (James y Ngarmsak, 2010).

f) *Tratamiento alternativo*

En ocasiones un tratamiento alternativo es necesario para retrasar la decadencia fisiológica de los tejidos del fruto, así como para estabilizar la superficie del mismo y prevenir los procesos de degradación que disminuyen su calidad. Los tratamientos de inmersión son beneficiosos debido a que eliminan algunas enzimas y sustratos que son liberados por las células dañadas del fruto durante su cortado (Soliva-Fortuny y Martín-Belloso, 2003), reduciendo la oxidación enzimática y la carga microbiana durante su almacenamiento.

Se han utilizado tratamientos con calcio para extender la vida útil de frutas y vegetales, ya que ayuda a mantener la integridad de la pared celular del fruto, manteniendo su firmeza e inhibiendo la senescencia del tejido. Por otro lado, los ácidos orgánicos (ácido láctico, ácido cítrico, ácido acético, entre otros) han sido utilizados como agentes antimicrobianos e inhibidores del oscurecimiento enzimático (Rico, *et al.*, 2007). Después de la inmersión, el líquido asociado con la solución y el mismo producto debe

ser removido antes del envasado usando vibradores para eliminar el agua a través de una malla transportadora, por secado con aire o con centrifugas de canasta.

g) *Envasado*

El envasado facilita la distribución de fruta fresca cortada de calidad para el consumidor. El envase protege al producto de daños físicos y previene la contaminación física y microbiológica. Tanto el almacenamiento en atmósferas controladas como el envasado en atmósferas modificadas se realizan, en general, con una baja proporción de oxígeno combinada con una alta concentración de dióxido de carbono (García, *et al.*, 2006).

La elaboración de frutas frescas cortadas generalmente incluye el envasado en atmósfera modificada, así como el almacenamiento en un rango de temperatura comprendido entre los 2-4 °C durante un período de vida útil del producto de aproximadamente 7-10 días (Martín Belloso y Oms Oliu, 2005).

### **1.2.3 Impacto fisiológico del procesado de frutas frescas cortadas**

El principio fundamental de la preservación de productos hortofrutícolas frescos se basa en que éstos son tejidos vivos y, en consecuencia, muestran respuesta fisiológica a las operaciones de procesado mínimo y al ambiente en el que son envasados (Lamikanra, 2002). Debido a lo anterior, cada etapa del proceso de elaboración juega un papel importante en los mecanismos de alteración de frutas frescas, tales como la deshidratación de su superficie, oscurecimiento enzimático, la degradación y oxidación de pigmentos (Rojas-Graü, *et al.*, 2009), el ablandamiento por rompimiento de tejidos, el aumento de la velocidad de respiración con la consecuente producción de etileno, aparición de olores y sabores desagradables y alteraciones microbianas, los cuales se observan con mayor frecuencia durante el pelado, descorazonado y cortado (Martín Belloso y Oms Oliu, 2005).

Durante las operaciones de procesado, la fruta fresca cortada sufre un estrés fisiológico con un aumento notable de las concentraciones de etileno durante las primeras horas posteriores al procesado de la fruta, el cual está relacionado con la regulación y control de los procesos metabólicos, principalmente la maduración. De esta forma la exposición de los frutos climatéricos al etileno resulta en el incremento de la actividad respiratoria del producto.

Al cortar el fruto se incrementa la velocidad respiración, la cual está asociada con la disminución de la vida útil del producto. El aumento en la velocidad de respiración ocasiona la pérdida de agua y la reducción en los niveles de carbohidratos, vitaminas y ácidos orgánicos, con un impacto negativo en el sabor y aroma (James y Ngarmak, 2010). La pérdida de agua degrada la membrana y pared celular resultando en la pérdida de turgencia y la pérdida de peso del producto.

De todas las consecuencias negativas mencionadas debido al cortado de frutas frescas, el oscurecimiento enzimático es considerado como una de las principales limitantes de la vida útil de productos frescos cortados. El oscurecimiento enzimático se debe a la reacción catalizada por las polifenol oxidasas (PPOs) con compuestos fenólicos, el cual se facilita por la difusión de  $O_2$  en el tejido cortado (Chung y Moon, 2009). En este aspecto, es necesario poner especial atención en algunas frutas durante las operaciones de reducción de tamaño, como el caso de las manzanas y peras, en las cuales el corazón y los tejidos adyacentes deben removerse completamente debido a que estas partes son más susceptibles al oscurecimiento.

#### **1.2.4 Oscurecimiento enzimático**

El oscurecimiento enzimático se considera como uno de los problemas más importantes relacionados con el cambio de color de las frutas frescas cortadas durante su procesamiento y almacenamiento, esta reacción resulta de una reacción enzimática catalizada por el grupo de enzimas polifenol oxidasas (PPOs). Esta reacción, como se muestra en la figura 4, consiste en la oxidación de sustratos fenólicos, encontrados de

forma natural en diversos frutos (Martín, *et al.*, 2006) y se desencadena cuando, después del cortado, se pierde la integridad celular del tejido de la fruta y la enzima entra en contacto con compuestos fenólicos. El sitio activo de la enzima consiste de dos átomos de cobre y ésta cataliza dos reacciones diferentes en presencia de oxígeno molecular (Queiroz, *et al.*, 2008): la hidroxilación de monofenoles a difenoles y la oxidación de difenoles a diquinonas, seguida de la formación no enzimática de melaninas, responsables del color oscuro que desarrollan los frutos (Chung y Moon, 2009).

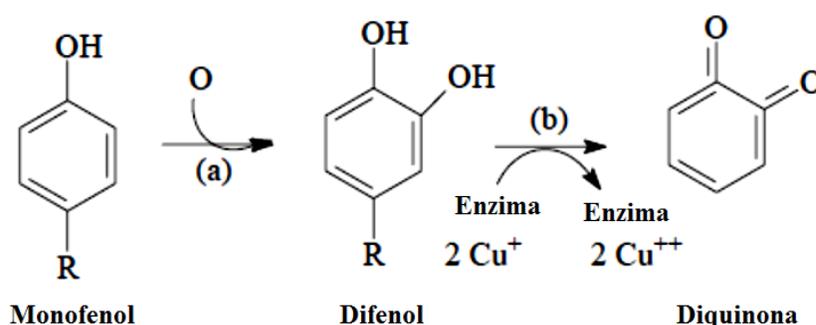


Figura 4. Reacciones (a) hidroxilación y (b) oxidación, catalizadas por las PPOs. (Queiroz, *et al.*, 2008)

Para que el oscurecimiento enzimático se lleve a cabo se requiere de la presencia de oxígeno molecular, los sustratos adecuados, la polifenol oxidasa y la presencia de cobre en el centro activo de la enzima. La velocidad en que se presente dependerá de la concentración y actividad de la enzima, la cantidad y naturaleza de compuestos fenólicos, pH, temperatura, actividad de agua y de la cantidad de oxígeno disponible en el ambiente. Debido a su composición química, pH y estructura, las peras y manzanas son muy sensibles al oscurecimiento enzimático (Pérez, 2003).

El oscurecimiento enzimático de la fruta se debe a procesos fisiológicos que tienen lugar durante la maduración, a procesos asociados a la recolección o a tratamientos tecnológicos de postcosecha. En las frutas frescas cortadas, las reacciones de oscurecimiento se desencadenan debido a la pérdida de la integridad celular en la superficie de la fruta tras las operaciones de pelado y reducción de tamaño.

#### ***1.2.4.1 Control del oscurecimiento enzimático***

Los métodos para controlar, minimizar o inhibir el oscurecimiento enzimático en frutas frescas cortadas son únicamente preventivos. Estos se basan en la inhibición de las enzimas (PPOs) y en el uso de algún método de conservación de alimentos, ya sea por métodos físicos o químicos (Pérez, 2003).

##### ***a) Métodos físicos***

Entre estos métodos se encuentran la conservación a bajas temperaturas la cual reduce la actividad enzimática y disminuye la velocidad de respiración; el producto tiene que permanecer en almacenamiento refrigerado, comercialmente en un rango de temperaturas entre 4 y 7 °C. Otra opción son los recubrimientos o películas comestibles, los cuales crean una micro-atmósfera controlada que restringe el intercambio de gases, impidiendo el acceso a las PPOs a uno de sus sustratos, el oxígeno. Estos recubrimientos consisten en combinaciones de polisacáridos, lípidos y/o proteínas, a las que se añaden plastificantes para mejorar su flexibilidad (González Buesa, *et al.*, 2003).

Finalmente se encuentra el envasado en atmósferas modificadas (EAM), donde los productos metabólicamente activos son recluidos en una atmósfera pobre en O<sub>2</sub> y rica en CO<sub>2</sub>, reflejándose en la reducción de la respiración, la disminución de la producción de etileno, la inhibición de reacciones enzimáticas, entre otros beneficios (Soliva-Fortuny y Martín-Belloso, 2003).

##### ***b) Métodos químicos***

Como su nombre lo indica, radica en el uso de agentes químicos que actúan como inhibidores directamente sobre las enzimas, los sustratos o los productos de las reacciones enzimáticas (Pérez, 2003), también pueden propiciar un medio inadecuado para el desarrollo de la reacción de oscurecimiento. Algunos ejemplos son los acidulantes; en la mayoría de las frutas la actividad de las PPOs se observa a un pH de 6.0 – 6.5, por lo

que el uso de químicos que reduzcan el pH del producto aplica ampliamente en el control del oscurecimiento enzimático.

Se ha reportado el uso de ácido cítrico y ácido ascórbico y sus derivados en concentraciones de 0.5 – 4.0 % para inhibir el oscurecimiento de productos frescos cortados, también se ha aplicado en combinación con cloruro de calcio en conjunto con el envasado en atmósferas modificadas. Algunos autores han sugerido el uso de 4-hexilresorcinol (4-HR), cisteína y N-acetilcisteína, entre otros (Soliva-Fortuny y Martín-Belloso, 2003).

El uso de dos o más métodos para el control del oscurecimiento enzimático presenta sinergismo. Así, por ejemplo, se ha sugerido el uso de agentes químicos en combinación con atmósferas modificadas para la preservación de frutas frescas cortadas.

#### ***1.2.4.2 Evaluación del oscurecimiento enzimático***

Tradicionalmente el grado de oscurecimiento enzimático ha sido cuantificado utilizando indicadores de oscurecimientos basados en un índice bioquímico, como el caso de la actividad de las polifenol oxidasas, y a partir de indicadores físicos, como el color en la superficie del alimento (Quevedo, *et al.*, 2009).

CIE Lab (CIE – *Comission Internationale de l'Eclairage*), o espacios L\*, a\*, y b\*, describen la coloración de la superficie del objeto de estudio. La luminosidad viene descrita por L\*, donde el color negro presenta luminosidad de cero, mientras que el blanco presenta luminosidad de 100. Los parámetros a\* (verde a rojo) y b\* (azul a amarillo) son dos componentes cromáticos, cuyos valores van de -120 a +120, que evalúan la saturación (pureza de un color) y el tono.

En el caso de los indicadores físicos basados en el color, las coordenadas L\*, a\* y b\*, han sido las más utilizadas, especialmente el valor a\* se usa como indicador de oscurecimiento en frutas como las manzanas, mientras que el valor de L\* es un

indicador útil de oscurecimiento durante el almacenamiento de frutos (Rocha y Morais, 2003). También a partir de los valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  es posible calcular el índice de oscurecimiento (IO), así como otros indicadores de color como el ángulo Hue ( $h_{ab}^*$ ) y el chroma ( $C^*$ ).

Otra forma en la que se ha evaluado el grado de oscurecimiento es midiendo la absorbancia a 420 nm de soluciones obtenidas de la extracción y purificación de los pigmentos oscuros solubles (Supapvanich, *et al.*, 2011). La desventaja de este método radica en que únicamente se miden los pigmentos solubles.

### **1.3 ENVASADO EN ATMÓSFERAS MODIFICADAS**

La vida de anaquel de productos perecederos, como las frutas y hortalizas, está limitada por la presencia de aire en función a dos factores: el efecto químico del oxígeno atmosférico y el desarrollo de microorganismos aerobios. Estos factores acarrear cambios en el olor, sabor, color y textura del alimento.

#### **1.3.1 Definición del envasado en atmósferas modificadas**

El envasado en atmósferas modificadas (EAM) es una forma de envasado que involucra la remoción de aire dentro del envase y su remplazo con un gas o una mezcla de gases; en el caso de una mezcla de gases, ésta se utiliza en función al tipo de producto (Parry, 1993). El EAM consiste en envasar los productos alimenticios en materiales con barrera a la difusión de los gases, la modificación el ambiente gaseoso disminuye el grado de respiración, reduce el crecimiento microbiano y retrasa el deterioro enzimático con el propósito de alargar la vida útil del producto.

Según las exigencias de la fruta u hortaliza a envasar se va a requerir cierto tipo de atmósfera, por ejemplo un ambiente rico en dióxido de carbono y pobre en oxígeno reduce el proceso de respiración en los productos, conservando sus características

fisicoquímicas, organolépticas y microbiológicas por mayor tiempo. Y en función a la atmósfera en cuestión, se elegirá el envase o película protectora (Ospina y Cartagena, 2008).

Es una técnica aplicada a alimentos metabólicamente activos, los cuales son reclusos en una atmósfera esencialmente pobre en  $O_2$  (2 – 8%) y rica en  $CO_2$  (5 – 15%) con respecto a las concentraciones normales del aire (Pérez, 2003). Un gradiente es creado entre la fruta y el exterior, en el cual se facilita la transferencia de gases entre el interior y el exterior del envase, y un equilibrio dinámico es establecido entre los gases producidos por la fruta y los de su entorno. En este equilibrio, el consumo de  $O_2$  y la emisión de  $CO_2$  son iguales a la liberación de éstos a través del envase (Mathlouthi, 1994).

La tecnología de EAM para productos frescos resulta en dos procesos cinéticos: la transferencia de gases a través del material de envase y la respiración del producto, por lo que el éxito del envasado en atmósferas modificadas depende de lo siguiente (Torrieri, *et al.*, 2009):

- La capacidad de predecir el fenómeno de transferencia de masa que ocurre entre el producto envasado y el ambiente.
- La geometría del envase y la cantidad de producto dentro.
- Las propiedades de barrera del envase.
- La composición del producto y su actividad biológica.

### **1.3.2 Generación de una atmósfera modificada**

El EAM consiste en una atmósfera pasiva de envasado, debido a que ésta se basa en el balance producido por efecto de la velocidad de respiración y la velocidad de transmisión de gases a través del envase. Este proceso genera y mantiene un equilibrio entre el  $CO_2$  y el  $O_2$  dentro de condiciones de estado estable al interior del envase. El

balance exacto entre valores de  $O_2$  y  $CO_2$  dependerá de la capacidad de intercambio gaseoso y la velocidad de respiración del producto.

La velocidad de respiración de un producto después de la cosecha inicialmente es alta y disminuye con el tiempo de almacenamiento hasta un nivel estable que depende, en gran medida, de la temperatura del sistema y la composición de la atmósfera. Por ello, con la finalidad de incrementar la vida útil del producto, se ha preferido el empleo de atmósferas modificadas activas en las que inicialmente se establece la concentración de gases del sistema. Una atmósfera modificada está diseñada en función a los flujos que permean a través del envase de tal manera que el  $CO_2$  producido sea transferido a la atmósfera externa, mientras que el  $O_2$  requerido debe ser transferido desde el ambiente al interior del envase. La reducción de  $O_2$  y el incremento de  $CO_2$  crean un gradiente de concentración entre la atmósfera y el envase.

La composición de la atmósfera en el envase se puede regular por diversos métodos, la sustitución mecánica del aire por otros gases o generando la atmósfera pasiva o activamente utilizando modificadores de atmósfera adecuados (Martín Belloso y Oms Oliu, 2005).

a) *Generación pasiva.*

Después de ser cosechadas las frutas frescas continúan sus procesos metabólicos, consumen oxígeno y producen dióxido de carbono y vapor de agua, y la modificación de la atmósfera alrededor del producto se lleva a cabo por el efecto de la respiración y permeabilidad de una película (Ospina y Cartagena, 2008). En este tipo de envasado la modificación de la atmósfera se genera por la interacción entre la velocidad de respiración del producto envasado y las características de permeabilidad del envase (elevada permeabilidad al  $CO_2$  y vapor de agua, y una baja permeabilidad al  $O_2$ ) a lo largo del almacenamiento o hasta alcanzar condiciones de equilibrio (Guevara, 2010).

En el equilibrio es posible lograr concentraciones entre 2 – 5 % de oxígeno y 3 – 8 % de dióxido de carbono, las cuales son eficaces para el incremento de la vida útil de productos hortofrutícolas, reduciendo la degradación de la clorofila, el crecimiento microbiano y el oscurecimiento enzimático (Parry, 1993).

b) *Generación activa.*

La modificación de la atmósfera se genera mediante la evacuación del aire en el interior del producto para posteriormente inyectar el gas o la mezcla de gases requerida en función del producto, disminuyendo el tiempo para llegar a las condiciones de equilibrio y mantener por más tiempo las condiciones óptimas del envasado de los productos (Guevara, 2010). En el envasado activo se pueden incorporar ciertos aditivos en la matriz del envase o dentro de éste para modificar la atmósfera en el espacio libre de cabeza, puede utilizar absorbedores de oxígeno, absorbedores-liberadores de dióxido de carbono, liberadores de etanol y absorbedores de etileno (Parry, 1993).

Independientemente de la forma en que se genera la atmósfera modificada, en ambos casos la concentración inicial de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en el espacio libre de cabeza al interior del envase varía debido al metabolismo respiratorio de las frutas frescas cortadas (figura 5). Los cambios se compensan con la difusión de gases a través del material de envasado hasta establecer una atmósfera en equilibrio. Después de cierto tiempo, la presión parcial del gas en el espacio libre de cabeza alcanza el estado estacionario cuando los intercambios por difusión a través del envase compensan la cantidad de O<sub>2</sub> que consume la fruta, recuperándolo con el O<sub>2</sub> del exterior, mientras que el exceso de CO<sub>2</sub> y el vapor de agua liberados durante la respiración salen del envase (Guillaume, *et al.*, 2011).

El equilibrio en un envase con atmósferas modificadas debe ocurrir lo más pronto posible después del envasado del producto y debe ser cercano a la atmósfera recomendada para mantener la calidad e inocuidad de los productos envasados.

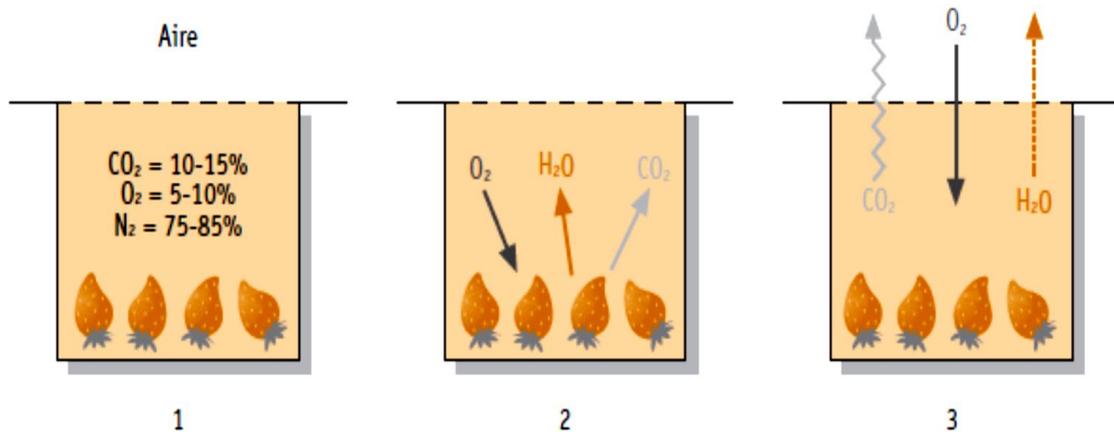


Figura 5. Difusión de gases en envases que contienen frutas frescas. 1) Composición inicial de la atmósfera; 2) consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono y vapor de agua debido al metabolismo del fruto; y 3) difusión de gases a través del envase. (García, Gago, y Fernández, 2006)

### 1.3.3 Gases utilizados en las atmósferas modificadas

Los tres principales gases usados en el envasado en atmósferas modificadas son el  $O_2$ ,  $CO_2$  y  $N_2$ , su elección depende del producto que será envasado. Individuales o en combinación, estos gases son comúnmente utilizados para extender la vida de anaquel con óptimas propiedades organolépticas de alimentos. Gases nobles o inertes como el argón son de uso comercial, por ejemplo, en café y botanas; sin embargo, su aplicación es limitada. Igualmente se ha reportado el uso de monóxido de carbono y dióxido de azufre en atmósferas modificadas (Sandhya, 2010).

#### a) *Oxígeno ( $O_2$ ).*

El oxígeno es probablemente el gas más importante ya que es vital en el desarrollo de microorganismos aerobios, en el metabolismo de frutas y vegetales, y participa en algunas reacciones enzimáticas en los alimentos (Parry, 1993). Concentraciones de  $O_2$  menores a las que existe en el aire (aproximadamente 21 %) provocan una reducción de la velocidad de respiración, un retraso en la maduración e incremento de la vida comercial de frutas, mientras que concentraciones menores al 2.5 % aumenta la

producción de anhídrido carbónico, generando sabores y olores anormales como reflejo del proceso de fermentación en ausencia de oxígeno (Ospina y Cartagena, 2008).

Usualmente se excluye de la atmósfera del envase para preservar la calidad del alimento y utilizado para mantener la mínima respiración aerobia de productos frescos, evita condiciones anaerobias, inhibe el oscurecimiento enzimático a altas concentraciones y a ciertas condiciones.

b) *Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).*

Este gas desplaza el O<sub>2</sub>, que es el gas vital para muchos microorganismos, cambiando el pH en la superficie del alimento por lo que tiene efecto inhibitorio sobre el crecimiento de microorganismos aerobios estrictos (Ospina y Cartagena, 2008). Altas concentraciones de este gas disminuye la tasa respiratoria de frutas y hortalizas, retrasa la deterioración causada por bacterias Gram negativa y mohos, y reduce el metabolismo fisiológico de productos frescos (Lee, *et al.*, 2008)

c) *Nitrógeno (N<sub>2</sub>).*

Es un gas inerte utilizado en atmósferas modificadas para desplazar al oxígeno como para retrasar la oxidación y prevenir la rancidez en productos con contenido graso. Otro papel importante del nitrógeno es el de actuar como relleno y prevenir el colapso del envase cuando se utilizan altas concentraciones de CO<sub>2</sub> (Parry, 1993).

La combinación de estos gases dependerá fundamentalmente de:

- El tipo de producto (contenido de humedad y grasa, intensidad de la respiración).
- El espacio de cabeza, ya que éste actúa como reservorio de CO<sub>2</sub> para conservar el gas que se pierde a través del envase.
- Material de envase.
- Temperatura de almacenamiento.

En la tabla 3 se presentan las condiciones de concentración de la mezcla de gases y temperatura de almacenamiento refrigerado requeridas para algunas frutas conservadas en atmósferas modificadas. Básicamente la mejor temperatura de conservación es la misma en todos los casos, la diferencia radica en la proporción de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> que requiera cada fruta.

Tabla 3. Condiciones requeridas de atmósfera modificada de algunas frutas frescas cortadas. (Lee, Arult, y Lencki, 1996)

<b>Producto</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>
Manzana	0 – 5	2 – 3	1 – 2
Chabacano	0 – 5	2 – 3	2 – 3
Cereza dulce	0 – 5	3 – 10	10 – 12
Higo	0 – 5	5	15
Kiwi	0 – 5	2	5
Nectarina	0 – 5	1 – 2	5
Durazno	0 – 5	1 – 2	5
Pera	0 – 5	2 – 3	0 – 1
Caqui	0 – 5	3 – 5	5 – 8
Ciruela	0 – 5	1 – 2	0 – 5
Frambuesa	0 – 5	10	15 – 20
Fresa	0 – 5	10	15 – 20

### 1.3.4 Materiales para el envasado en atmósferas modificadas

La función principal del envase es proteger al alimento del medio externo y preservar la atmósfera interna. La disponibilidad de materiales que pueden ser utilizados en el envasado en atmósferas modificadas es elevada; sin embargo, éstos deben presentar determinadas propiedades barrera al paso de los gases y la humedad. Dependiendo de las necesidades del alimentos pueden emplearse películas de alta barrera o por láminas permeables al paso de los gases, como sucede con los productos con actividad metabólica intensa (García, *et al.*, 2006).

Se pueden utilizar diversos materiales en el envasado en atmósferas modificadas, entre los que se destacan: el polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), el poliestireno (PS), poliestireno de alto impacto (HIPS) (Guevara, 2010), policloruro de vinilo (PVC) y polipropileno biorientado (BOPP), entre otros (Ospina y Cartagena, 2008).

Tabla 4. Características deseables de los materiales empleados en el EAM.  
(García, *et al.*, 2006)

<b>Propiedad</b>	<b>Características del material</b>	<b>Comentarios</b>
Barrera o de protección	Barrera frente a gases, humedad y olores. Protección frente a la luz. Resistencia a grasas y aceites	Deben preservar el alimento y la atmósfera interna del ambiente externo.
Técnicas o mecánicas	Resistencia a fuerzas de tracción y fricción. Resistencia frente a impactos, desgarros, perforaciones y abrasiones. Flexibilidad para soportar la presión interna de los gases. Aptitud para el termoformado. Facilidad de sellado	Impuestas por el proceso de envasado, la maquinaria utilizada y la manipulación final de los envases.
Comerciales	Brillo y transparencia. Capacidad antivaho. Facilidad de apertura. Aptitud para la impresión y la adición de etiquetas y códigos.	Presentación atractiva y manipulación sencilla y práctica para el consumidor.
Otras	Rendimiento y coste por metro cuadrado. Disponibilidad en el mercado. Inercia química.	Económicas. Legales. Medioambientales.

Además de las propiedades de barrera, es deseable que los materiales de envase cuenten con las otras características como se muestra en la tabla 4 para ser utilizados en el EAM; por lo que debe contar con las propiedades mecánicas adecuadas para hacer frente a los factores ambientales durante su manipulación, además de poseer propiedades

comerciales adecuadas ya que el envase es el medio de presentación y promoción del producto, por lo tanto su diseño debe ser tal que pueda captar la atención del consumidor, resultando atractivo y cómodo. Por último, en la selección del material de envasado hay que tomar en cuenta otros aspectos de tipo económico, legal y medioambiental.

### **1.3.5 Ventajas y desventajas del envasado en atmósferas modificadas**

Los beneficios o perjuicios derivados del envasado en atmósferas modificadas dependen del tipo de producto, variedad, tipo de cultivo, estado fisiológico inicial, composición de la atmósfera, temperatura, humedad relativa y tiempo de almacenamiento (Artés, 2006).

Frente a otras tecnologías, el envasado en atmósfera modificada ofrece las siguientes ventajas:

- Es un sistema aplicable a una amplia variedad de productos (vegetales, cárnicos, lácteos) sin importar el tratamiento de elaboración y conservación que se someten y sus características.
- Mantiene la calidad sensorial del producto al inhibir las reacciones de oscurecimiento y oxidación.
- Soporta el metabolismo activo de los productos frescos y mínimamente procesados.
- Disminución de algunos daños por frío y senescencia.
- Disminución de la biosíntesis de etileno y compuestos aromáticos.
- Frenado del proceso de maduración.
- Mantenimiento de la textura con menor ablandamiento.

Por otro lado, entre los principales inconvenientes del envasado en atmósfera modificada se encuentran:

- Es imprescindible realizar un buen diseño de la atmósfera interna para garantizar la conservación del producto durante el tiempo necesario.
- Una vez cerrado el envase no se puede controlar la composición gaseosa del espacio de cabeza en el interior del mismo, por lo tanto no se pueden compensar las variaciones de gas debido al metabolismo del fruto y la permeabilidad del envase.
- Pueden presentar problemas de colapso del envase y formación de exudado en atmósferas con una proporción elevada de dióxido de carbono.
- Sensibilización de los tejidos a los daños por frío y elevadas concentraciones de dióxido de carbono, con desarrollo de oscurecimiento y necrosis.
- Alteración del sabor y aroma por formación de etanol, acetaldehído y otros compuestos

### **1.3.6 Efecto de la atmósfera modificada sobre la velocidad de respiración**

La respiración es el proceso central del metabolismo de las frutas ya que provee de energía para las reacciones anabólicas que ocurren durante la maduración (Gomes, *et al.*, 2010). Las frutas frescas se deterioran debido a su respiración y uno de los principales efectos del EAM sobre el metabolismo de productos hortofrutícolas es la reducción de su velocidad de respiración, lo cual disminuye el consumo de sustratos, la producción de CO<sub>2</sub> y el consumo de O<sub>2</sub> (Mathlouthi, 1994).

Al someter el tejido del fruto a la operación de cortado se eleva la producción de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), lo que estimula la velocidad de respiración y, consecuentemente, acelera el deterioro y senescencia de los tejidos (Fonseca, *et al.*, 2002). La velocidad de respiración se ve afectada por varios factores internos, como el estado de madurez; y externos, de los cuales la temperatura y la presión parcial de oxígeno ejercen gran influencia.

En general, los elevados niveles de CO<sub>2</sub> inducen mayor sensibilidad a los bajos niveles de O<sub>2</sub>, mientras que en condiciones con 0.06 – 0.15 kPa de O<sub>2</sub> no se produce fermentación. Respetando estos límites, el EAM reduce la tasa respiratoria, frena la

biosíntesis de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, la maduración, el ablandamiento del tejido y la pérdida de azúcares, la degradación de clorofilas, antociananos y carotenos (manteniendo el color de los productos), preserva el valor nutritivo (vitamina A y C) y limita la alteración microbiana y el oscurecimiento enzimático (Artés, 2006).

Se han utilizado atmósferas con bajas concentraciones de oxígeno (1 – 5 %) y altas en dióxido de carbono (5 – 10%) para alargar la vida útil de frutas frescas cortadas y vegetales, reduciendo su velocidad de respiración (Rojas-Graü, *et al.*, 2009). De esta forma al reducir la concentración de O<sub>2</sub> se inhiben o reducen las reacciones enzimáticas de oscurecimiento, y al aumentar la concentración de CO<sub>2</sub> se inhibe la síntesis de metabolitos fenólicos (Pérez, 2003).

### 1.3.7 Métodos experimentales para medir la velocidad de respiración

La velocidad de respiración de productos frescos se puede expresar como la velocidad de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>. Los métodos más utilizados para determinar la velocidad de respiración son (Fonseca, *et al.*, 2002):

#### a) *Sistema estático.*

En este tipo de sistema, también conocido como sistema cerrado, consta de un recipiente impermeable y de volumen conocido, el cual contiene el producto; posteriormente la mezcla de gases, de composición conocida, es inyectada en el recipiente y éste es sellado (Torrieri, *et al.*, 2009). Se monitorean los cambios en la composición de la mezcla de gases en cierto período de tiempo para ser utilizados en la estimación de la velocidad de respiración (ecuaciones 1 y 2) (Fonseca, *et al.*, 2002). Este método es adecuado para productos con velocidades de respiración bajas.

$$R_{O_2} = \frac{(y_{O_2}^{t_i} - y_{O_2}^{t_f}) * V_f}{100 * M * (t_f - t_i)} \quad \text{Ec. 1}$$

$$R_{CO_2} = \frac{(y_{CO_2}^{tr} - y_{CO_2}^{ti}) * V_f}{100 * M * (t_f - t_i)} \quad \text{Ec. 2}$$

El espacio libre de cabeza al interior del envase está dado por la siguiente expresión (ecuación 3):

$$V_f = V - \frac{M}{\rho} \quad \text{Ec. 3}$$

La desventaja de este método radica en la dificultad para estimar el volumen de gas (o volumen libre), además la reducción de O<sub>2</sub> y la producción de CO<sub>2</sub> puede afectar la velocidad de respiración durante su muestreo. Por lo tanto, para determinar el período de tiempo entre cada muestreo, debe considerarse que la diferencia de concentraciones debe ser suficiente para garantizar una modificación notoria de la atmósfera y que la modificación de las concentraciones debe ser mínima para evitar que se vea afectada la velocidad de respiración (Fonseca, *et al.*, 2002).

b) *Sistema de flujo continuo.*

El producto se coloca en un recipiente impermeable, en el cual fluye una mezcla de gases a velocidad constante. Las velocidades de respiración se calculan a partir de las diferencias absolutas en la concentración de gas a la entrada y a la salida cuando el sistema alcanza el estado estacionario (ecuación 4 y 5).

$$R_{O_2} = \frac{(y_{O_2}^{en} - y_{O_2}^{sal}) * F}{100 * M} \quad \text{Ec. 4}$$

$$R_{CO_2} = \frac{(y_{CO_2}^{sal} - y_{CO_2}^{en}) * F}{100 * M} \quad \text{Ec. 5}$$

La limitación de este sistema se basa en la dificultad para determinar el flujo y no es suficientemente exacto para determinar velocidades e respiración a bajas temperaturas y/o a bajos niveles de O<sub>2</sub>. Además únicamente funciona para productos con elevada respiración.

c) *Sistema permeable.*

En un sistema permeable, un envase de dimensiones y permeabilidad conocidas es llenado con el producto. Las concentraciones en estado estacionario de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> son determinadas y se estiman las velocidades de respiración por medio de un balance de masa en el sistema (ecuaciones 6 y 7) (Fonseca, *et al.*, 2002).

$$R_{O_2} = \frac{P_{O_2} * A}{L * M} * (p_{O_2}^{ext} - p_{O_2}) \quad \text{Ec. 6}$$

$$R_{CO_2} = \frac{P_{CO_2} * A}{L * M} * (p_{CO_2} - p_{CO_2}^{ext}) \quad \text{Ec. 7}$$

Este último método es menos exacto debido a que se encuentra involucrado un mayor número de variables, éstas incluyen las dimensiones del envase (volumen libre, área superficial y el espesor del envase en el cual se da el intercambio gaseoso), al igual que sus características de permeabilidad.

El coeficiente de respiración (RQ) representa la relación entre el CO<sub>2</sub> producido y el O<sub>2</sub> consumido, el cual es aproximadamente uno en condiciones aerobias, aunque éste depende de la composición bioquímica del material orgánico. El RQ está dado por la ecuación 8 una vez que es determinada la velocidad de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> (Torrieri, *et al.*, 2009).

$$RQ = \frac{R_{CO_2}}{R_{O_2}} \quad \text{Ec. 8}$$

## **1.4 MODELADO DE ATMÓSFERAS MODIFICADAS**

Un modelo intenta expresar el comportamiento de un sistema a partir del conocimiento de las propiedades de sus componentes, los cuales son utilizados para facilitar predicciones o cálculos. Al hablar del modelado cinético se refiere a traducir una reacción química, física o microbiana en función del tiempo al lenguaje matemático, resultando en una relación matemática que pueda ser utilizada para optimizar, diseñar y predecir la calidad de los alimentos (Van Boekel, 2009). La importancia de los modelos radica en que proporcionan vías objetivas para medir la calidad y determinar los límites de la vida útil del alimento.

### **1.4.1 Finalidad del modelado de atmósferas modificadas**

El desarrollo de modelos en el envasado en atmósferas modificadas sirve para dos propósitos: el diseño de envases y la predicción o simulación de la composición de gases en la atmósfera dentro del envase durante su almacenamiento (Laurence, *et al.*, 1996). Diversos estudios sobre la velocidad de respiración han sido orientados al análisis de la influencia de la temperatura de almacenamiento y la concentración de gases, siendo muchos de estos orientados al diseño de envases especiales para una temperatura de almacenamiento específica (Fonseca, *et al.*, 2002).

En el ámbito de productos hortofrutícolas frescos cortados, diversos investigadores han modelado la interacción del producto y la atmósfera del envase con el fin de establecer el diseño del envasado en atmósferas modificadas. Sin embargo, ningún modelo abarca todos los parámetros relacionados con el sistema: los parámetros relacionados con el producto (velocidad de respiración, coeficiente respiratorio, área superficial, concentraciones óptimas de almacenamiento, etc.), los parámetros relacionados con el envase (permeabilidad de la película a los gases, área superficial, espesor) y los parámetros ambientales (temperatura, humedad relativa) (Guevara, 2010).

El común denominador de los modelos que se han desarrollado en el ámbito de las atmósferas modificadas es que éstos permiten definir las características del envase (permeabilidad a los gases y espesor de la película) para poder envasar una cierta cantidad de producto, así como establecer las condiciones de equilibrio al interior del envase al evaluar las concentraciones de gases con respecto al tiempo.

#### **1.4.2 Niveles en el modelado de atmósferas modificadas**

Existen diferentes niveles desde los cuales pueden modelarse el envasado en atmósferas modificadas de productos hortofrutícolas. Estos niveles van desde el nivel macro (envases estibados), pasando por la vía meso (envases individuales) hasta el nivel micro (producto envasado).

a) *Nivel macro.*

En el nivel macro una corriente de aire forzado dentro de una cámara de refrigeración, y por lo tanto la convección forzada, es responsable de la transferencia de calor y masa a través de los envases en atmósferas modificadas individuales. Las investigaciones en este nivel se han enfocado en la transferencia de calor y masa, los efectos de las capas límite y los diferentes patrones de flujo según las geometrías, tipo de enfriamiento y ventilación (Hertog y Banks, 2000).

b) *Nivel meso.*

En este nivel se encuentran los envases individuales, en el cual los procesos de transferencia de calor y de masa están regidos por la convección natural y los procesos de difusión debidos a la concentración y gradientes de temperatura (Hertog y Banks, 2000). El calor producido por el producto es conducido directamente, o mediante la atmósfera al interior, por el material de envase y eventualmente es expulsado a los alrededores. Dentro del envase el vapor de agua, los gases metabólicos consumidos ( $O_2$ ) y/o producidos ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $C_2H_4$ ) son intercambiados entre la atmósfera interna y

externa por difusión a través de una película semi-permeable. Las condiciones de estado estacionario en el envase con atmósferas modificadas resultan de los flujos de entrada y salida del mismo y del consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> del producto.

c) *Nivel micro.*

En este nivel el producto se considera que el fruto genera sus propias condiciones de atmósfera modificada debido a la resistencia de su piel, por lo que las condiciones internas de gas actúan sobre el metabolismo del producto, lo que a su vez influye sobre las propiedades del fruto que determinan su calidad. Aquí se ve involucrado el intercambio de gases (consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>), la difusión de gases entre el producto y sus alrededores y dentro de las células del mismo, la difusión y pérdida de agua, el efecto del etileno sobre el metabolismo del fruto, la calidad del producto, entre otros (Hertog y Banks, 2000).

#### **1.4.3 Parámetros que influyen en el modelado de atmósferas modificadas**

El modelado del EAM depende de diversas variables: las características del producto, su masa, la composición recomendada de la atmósfera, la permeabilidad a los gases de los materiales de envase y su dependencia con la temperatura y la velocidad de respiración del producto afectada por las diferentes mezclas de gases y la temperatura (Fonseca, *et al.*, 2002).

Diversos modelos han sido propuestos para predecir la cinética de respiración de diferentes frutas y vegetales a diferentes condiciones de almacenamiento. Como se mencionó anteriormente, la velocidad de respiración depende de múltiples factores que incluyen la temperatura de almacenamiento, la composición de la atmósfera, la variedad y el estado de madurez del producto, lo que dificulta formular un único modelo que incorpore todos estos factores (Ravindra y Goswami, 2008).

Al hablar del modelado de la velocidad de respiración en el envasado en atmósferas modificadas de productos hortofrutícolas, los principales factores que influyen en el modelado de una atmósfera modificada son la composición de gases dentro del envase y la temperatura, tanto el efecto individual de estas variables así como su efecto en conjunto.

#### ***1.4.3.1 Influencia de la composición de gases***

Se han reportado modelos basados en la teoría de cinética enzimática y otros en las teorías de adsorción (Fonseca, *et al.*, 2002). La dependencia de la velocidad de respiración con la concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> ha sido expresada por la ecuación de Michaelis-Menten (Gomes *et al.*, 2010; Torrieri *et al.*, 2009), la cual es uno de los modelos más utilizados para describir la dependencia de la concentración de O<sub>2</sub> sobre la velocidad de respiración. Este modelo está basado en un mecanismo de una reacción enzimática limitada donde el sustrato es el O<sub>2</sub> (Zhang, *et al.*, 2011), como se muestra en la ecuación 9.

$$R_{O_2} = \frac{R_{O_2}^{\max} y_{O_2}}{K_m + y_{O_2}} \quad \text{Ec. 9}$$

Por otro lado, el papel del CO<sub>2</sub> en la respiración se ha sugerido para estar mediado por la vía de los mecanismos de inhibición enzimática de las ecuaciones de Michaelis-Menten, pudiendo ser (Fonseca, *et al.*, 2002):

##### *a) Competitiva.*

La cual ocurre cuando ambos, el inhibidor (CO<sub>2</sub>) y el sustrato (O<sub>2</sub>) compiten por el mismo sitio activo de la enzima (ecuación 10). En este caso, la velocidad de respiración máxima es menor en concentraciones altas de CO<sub>2</sub>.

$$R_{CO_2} = \frac{R_{O_2}^{\max} y_{O_2}}{K_m \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{K_i}\right) + y_{O_2}} \quad \text{Ec. 10}$$

b) *Acompetitiva.*

Esta ocurre cuando el inhibidor, es decir el CO<sub>2</sub>, reacciona con el complejo enzima-sustrato. En este caso, la velocidad de respiración máxima no es relativamente afectada por altas concentraciones de CO<sub>2</sub>. La ecuación 11 describe el comportamiento de la inhibición incompetitiva del CO<sub>2</sub>.

$$R_{CO_2} = \frac{R_{O_2}^{\max} y_{O_2}}{K_m + y_{O_2} \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{K_i}\right)} \quad \text{Ec. 11}$$

c) *No competitiva.*

Ocurre cuando el inhibidor reacciona tanto con la enzima como con el complejo enzima-sustrato.

$$R_{CO_2} = \frac{R_{O_2}^{\max} y_{O_2}}{\left(K_m + y_{O_2}\right) \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{K_i}\right)} \quad \text{Ec. 12}$$

d) Una combinación de inhibición competitiva y incompetitiva.

Se han reportado diversos modelos que describen la velocidad de respiración de productos mínimamente procesados, dentro de los cuales el más utilizado es el que se basa en los mecanismos de inhibición enzimática competitiva, donde el sustrato es el O<sub>2</sub> (Ravindra y Goswami, 2008).

### 1.4.3.2 Influencia de la temperatura

Diversos estudios han mostrado que la temperatura tiene un efecto significativo sobre la velocidad de respiración de los productos hortofrutícolas. La influencia de la temperatura en la velocidad de respiración fue cuantificada como el valor  $Q_{10}$  (ecuación 13), el cual indica el incremento de la respiración por cada incremento de  $10^{\circ}\text{C}$  en la temperatura (Zhang, *et al.*, 2011). En frutas y vegetales el valor de  $Q_{10}$  varía de uno a cuatro dependiendo del rango de temperatura.

$$Q_{10} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}} \quad \text{Ec. 13}$$

El valor de la velocidad de respiración a temperaturas desconocidas puede ser determinado al linealizar la ecuación 12 y utilizando el valor de  $Q_{10}$  para el rango en el cual se encuentra el valor de la temperatura desconocida.

La ecuación de Arrhenius (Zhang, *et al.*, 2011), ecuación 14, es utilizada para cuantificar el efecto de la temperatura en la velocidad de respiración, ya sea como velocidad de consumo de oxígeno o de producción de dióxido de carbono, y el uso simultáneo de esta ecuación describe la influencia de la temperatura sobre la permeabilidad de la película en un sistema de envasado en atmósfera modificada (Fonseca, *et al.*, 2002).

$$R_{\text{O}_2}, R_{\text{CO}_2} = \delta \exp\left(-\frac{E_a}{R_c T}\right) \quad \text{Ec. 14}$$

### 1.4.4 Modelado de la transferencia de gases en el envasado en atmósferas modificadas

El fin de modelar la transferencia de gases a través del envase es simular las concentraciones al equilibrio de  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  dentro del envase. El desarrollo de este tipo de modelos está basado en balances de masa que describen el cambio de la

concentración de los gases antes mencionados con respecto al tiempo. Este cambio, a su vez, se encuentra influenciado por la permeabilidad del envase, la intensidad con la que respira el producto y el entorno en el que se encuentra el envase.

El balance global de masa establece la siguiente igualdad:

$$\begin{array}{l} \text{Tasa de disminución} \\ \text{de O}_2 \text{ o acumulación} \\ \text{de CO}_2 \text{ en el envase} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Tasa de permeación de O}_2 \text{ o} \\ \text{CO}_2 \text{ a través del envase} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Tasa de consumo de O}_2 \text{ o de} \\ \text{producción de CO}_2 \text{ debido a} \\ \text{la respiración} \end{array}$$

Se puede asumir que en estado estacionario el total de la presión dentro del envase es constante, y que el cambio en los valores de las presiones parciales de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> dentro del envase es, en cualquier momento, cero. Las ecuaciones de balance que describen el cambio de la concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en el envasado en atmósferas modificadas son las siguientes (Zhang, *et al.*, 2011).

$$V \frac{dy_{O_2}^{in}}{dt} = \frac{P_{O_2}}{x} A (p_{O_2}^{ext} - p_{O_2}^{int}) - MR_{O_2} = 0 \quad \text{Ec. 15}$$

$$V \frac{dy_{CO_2}^i}{dt} = \frac{P_{CO_2}}{x} A (p_{CO_2}^{int} - p_{CO_2}^{ext}) + MR_{CO_2} = 0 \quad \text{Ec. 16}$$

Los balances de masa anteriores (ecuaciones 15 y 16) son útiles en diferentes aplicaciones como en la selección de materiales de envase en función al estado de equilibrio del envase, el espesor de la película y la cantidad de producto a envasar.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

### 2.1 PROBLEMA Y OBJETIVOS

#### **Problema**

La búsqueda de productos “listos para consumir” ha llevado a la comercialización de fruta fresca cortada; sin embargo, al ser tejidos vivos que respiran, las operaciones relacionadas a su producción ocasionan el deterioro del fruto, manifestándose en el oscurecimiento del mismo. Las frutas frescas cortadas pueden comercializarse en forma individual y en ensalada, éste último dificulta la selección del método de conservación adecuado debido a la diferencia entre la velocidad de respiración que presenta cada uno de sus elementos, lo que repercute en el diseño del envasado en atmósferas modificadas de un producto. En este aspecto, el modelado es útil en el diseño de EAM al predecir el fenómeno de transferencia de masa entre el producto, el envase y el medio ambiente que lo rodea.

#### **Objetivo general**

Desarrollar un modelo de la velocidad de respiración e índice de oscurecimiento de una ensalada de manzana-pera envasada en atmósferas modificadas evaluando los cambios de la velocidad de consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono en almacenamiento refrigerado.

*Objetivo particular 1.* Determinar el cambio de la velocidad de consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono, en función a la temperatura de refrigeración, la masa de producto y la composición de la atmósfera, midiendo los cambios de la concentración de oxígeno y dióxido de carbono en el espacio libre de cabeza al interior del envase para la obtención de un modelo cinético.

**Objetivo particular 2.** Establecer el efecto de las concentraciones de gases sobre los cambios en la cinética de respiración en relación a la velocidad de consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono en almacenamiento refrigerado, determinando los cambios en el espacio libre de cabeza al interior del envase.

**Objetivo particular 3.** Establecer la efectividad de una atmósfera modificada en la conservación de una ensalada de manzana-pera determinando los cambios del índice de oscurecimiento a partir de las variaciones de color en las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , y la correlación que existe entre la concentración de oxígeno y dióxido de carbono al interior del envase.

## **2.2 SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE VARIABLES**

Las operaciones de procesado mínimo de frutas frescas cortadas provocan un impacto fisiológico considerable sobre el fruto, su velocidad de respiración se incrementa, y esto se asocia con la disminución o pérdida de su vida útil. Dentro de las diferentes consecuencias negativas relacionadas al procesado mínimo, el oscurecimiento enzimático es la mayor limitante de la calidad de frutas frescas cortadas. El oscurecimiento de fruta fresca cortada es afectado por el cambio de la velocidad de respiración de frutas frescas cortadas; y a su vez la concentración de gases dentro del envase y la temperatura de almacenamiento son los principales factores que influyen en la velocidad de respiración de este tipo de productos envasados en atmósferas modificadas. Mientras que la masa del producto influye sobre el espacio libre de cabeza al interior del envase, sitio en el cual varía la concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  debido al metabolismo del fruto y la difusión de gases a través del material de envasado.

Debido a lo anterior, se consideraron estas tres variables (masa del producto envasado, concentración de gas o gases al interior del envase y la temperatura de almacenamiento refrigerado) para desarrollar un modelo de la velocidad de respiración e índice de oscurecimiento basado en la teoría de cinética química. En la tabla 5 se presentan, en forma de resumen, los factores mencionados anteriormente.

Tabla 5. Selección de variables.

<b>Variable independiente</b>	<b>Niveles de variación</b>	<b>Variable dependiente</b>	<b>Variable de respuesta</b>	<b>Instrumento</b>
Masa del producto	100, 125 y 150 g	Concentración de O <sub>2</sub>  Concentración de CO <sub>2</sub> .  Parámetros de color L*, a* y b*	Velocidad de consumo de O <sub>2</sub>	Analizador de O <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> Quantex Instruments modelo 509
Concentración de dióxido de carbono	5 y 10%		Velocidad de producción de CO <sub>2</sub>	
Temperatura de refrigeración	5, 10 y 15°C		Índice de oscurecimiento, ángulo hue y croma	Espectrofotómetro Konica Minolta CM-5

## 2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

### 2.3.1 Acondicionamiento de la cámara de almacenamiento refrigerado

Con la finalidad de tener un control de la temperatura durante la experimentación, fue necesario acondicionar las cámaras de almacenamiento a 5, 10 y 15 °C. Se manipuló el termostato que se encuentra en cada cámara para ajustar la temperatura en el interior de ésta. Se midió la temperatura del medio de enfriamiento (aire) en determinado tiempo utilizando un termopar digital (LASCAR RH/Temperature Data Logger EL-USB 2, U.S.A.), para posteriormente obtener la historia térmica del aire.

Para alcanzar la temperatura deseada se aisló la parte superior de la cámara utilizando una placa de poliestireno expandido, a cierta distancia de la salida del evaporador, para redireccionar y disminuir el flujo de aire, consiguiendo el incremento de la temperatura al interior de la cámara, lo que permitió obtener la temperatura deseada ( $\pm 1$  °C). La temperatura de las cámaras fue monitoreada todos los días utilizando un termómetro bimetalico en cada una.

### **2.3.2 Selección y control de la materia prima**

Se utilizaron manzanas (*Pyrus malus*) de la variedad Gala y peras (*Pyrus communis*) de la variedad Anjou, las cuales fueron adquiridas en la Central de Abasto de Tultitlán, Estado de México. Fueron seleccionadas en función a su tamaño y contenido de sólidos solubles, descartando aquellas que presentaran daño mecánico o contaminación. Las manzanas debían tener un contenido de sólidos solubles de 12 % como mínimo en las variedades rojas y bicoloreadas o parcialmente rojas (NMX-FF-061-SCFI-2003), que es a la que pertenecen la variedad Gala. Por otro lado, las peras debían contener 13 % de sólidos solubles totales (López, 2003). Para descartar la fruta debido al daño mecánico o contaminación se tomó en cuenta a la clasificación de daños presentada en el Apéndice Informativo de la NMX-FF-061-SCFI-2003.

#### **2.3.2.1 Tamaño**

El tamaño de la fruta se determinó con base al diámetro ecuatorial para manzanas en envase de cartón/madera con charolas. Debido a que tanto la manzana como la pera son frutas de pomo, la clasificación por tamaño se llevó a cabo en base a la NMX-FF-061-SCFI-2003. Se adquirieron las frutas de tamaño comercial (calibre) 100.

#### **2.3.2.2 Contenido de sólidos solubles**

El contenido de sólidos solubles se determinó con el índice de refracción, el cual mide la refracción de la luz a través de una solución y es empleado para determinar la calidad de fruta ya que se encuentra relacionado con la cantidad de sólidos solubles, es decir, la cantidad de sacarosa que contienen dichos productos. De esta forma, la cantidad de sacarosa se expresa en grados Brix, que equivale al porcentaje de peso de la sacarosa contenido en una solución acuosa (Meyer, 2008).

Para determinar el porcentaje de sólidos solubles, se utilizó un refractómetro manual (ATAGO N-1 $\alpha$ , Japón). Se trituraron 5 g de muestra con el fin de obtener el jugo de la muestra completa. Inmediatamente se colocaron 1-2 gotas del jugo obtenido sobre el prisma del refractómetro, después de cerrar la placa sobre la muestra se visualizó, a contraluz, a través del lente observando directamente los grados Brix.

### **2.3.3 Elaboración de la ensalada de manzana-pera**

Tanto las manzanas como las peras, enfriadas previamente a la temperatura de almacenamiento (manzana a 5 °C y pera a 10 °C) se lavaron con agua y jabón líquido, posteriormente se desinfectaron utilizando una solución de hipoclorito de sodio 100 ppm y a 5 °C, por medio de inmersión durante tres minutos. Ya limpias y secas, se eliminó el pedúnculo en el caso de la pera; y con un descorazonador-cortador se separó el corazón de la parte comestible al mismo tiempo que se rebanaba la fruta en ocho partes iguales. Aquellas rebanadas de manzanas y peras que presentaran aspectos anómalos, como oscurecimiento interno o pulpa traslúcida, fueron descartadas.

Una vez que la fruta fue cortada, ésta se sometió a un tratamiento antioxidante con cloruro de calcio y ácido cítrico (Droguería Cosmopolita, México) en solución. Lo anterior se llevó a cabo sumergiendo la ensalada primero en la solución de cloruro de calcio 0.5 % durante dos minutos, seguido del escurrido de la fruta durante otros dos minutos para finalizar con una nueva inmersión en ácido cítrico al 1 % en solución durante dos minutos. Posteriormente se dejó escurrir la ensalada para poder envasarla.

### **2.3.4 Envasado en atmósferas modificadas**

La ensalada de manzana-pera se envasó en dos tipos de sistemas: permeable y estático. En el sistema permeable se envasó la ensalada en envases media barrera fabricada con películas flexibles de polipropileno extruido de una capa (ITISA Alimentos, México), con dimensiones de 0.165 x 0.135 m, 0.038 mm de espesor y permeabilidad al oxígeno

de  $5.0849\text{E-}9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ atm}^{-1}$  y al dióxido de carbono de  $2.1886\text{E-}8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ atm}^{-1}$ . Mientras que en el sistema estático se utilizaron envases de alta barrera de siete capas coextruídas (ITISA Alimentos, México), con dimensiones de 0.197 x 0.144 m,  $7.5\text{E-}5$  m de espesor y baja permeabilidad al oxígeno y dióxido de carbono. Las condiciones de envasado fueron las mismas que en ambos casos.

Se introdujo aproximadamente 100, 125 y 150 g de ensalada en proporción de 1:1 de la fruta en cada envase según fuera el caso. Se utilizó una cámara de vacío (MULTIVAC A300/16, Alemania). Se programaron las presiones necesarias para evacuar el aire del envase (200 mbar) y para la introducción de la mezcla de gases (450 mbar), así como el tiempo de sellado de dos segundos para los envases de alta barrera y un segundo para los de media barrera. Se utilizaron dos mezclas de gases (INFRA, México), las cuales se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Mezclas de gases utilizadas en el envasado en atmósferas modificadas.

<b>Gas</b>	<b>Mezcla 1</b>	<b>Mezcla 2</b>
Oxígeno	5 %	5%
Dióxido de carbono	5 %	10 %
Nitrógeno	90 %	85 %

Una vez programada, la envasadora se conectó a una válvula reguladora de presión y ésta, a su vez, al tanque del gas a utilizar, se abrió la válvula reguladora a 2 bar, se introdujeron los envases con producto (dos envases por ciclo) y se cerró la campana de vacío, comenzando automáticamente el envasado. Una vez envasada la ensalada, se almacenaron los envases a las temperaturas de refrigeración (5, 10 y 15 °C) evaluadas.

En los dos tipos de sistemas evaluados se elaboraron doce envases por cada evento del diseño estadístico debido a que el monitoreo de los gases era una prueba destructiva, por lo que sería imposible seguir monitoreando el mismo envase.



Figura 6. Ensalada de manzana-pera envasada en atmósferas modificadas.

### 2.3.5 Monitoreo del cambio de la concentración de $O_2$ y $CO_2$ al interior del envase

Se monitoreó la concentración de gases al interior del envase utilizando un analizador oxígeno-dióxido de carbono (Quantex Instruments 905, U.S.A.). Para determinar la concentración (% v/v) de gas se colocó una septa de hule espuma sobre la superficie del envase para posteriormente perforar, a través de ésta, el envase con la jeringa acoplada al filtro particulado del analizador. Una vez introducida la jeringa se extrajo la muestra de gas, la cual pasaba al sensor de oxígeno cuando se encendía la bomba. Se obtuvo la lectura directa del porcentaje de  $O_2$  y  $CO_2$  después de un cierto tiempo en el cual se estabilizaba la lectura (10-12 segundos).



Figura 7. Analizador de  $O_2$ - $CO_2$  Quantex Instruments 905, U.S.A.

Se realizó el monitoreo de gases a siete envases (réplica) de cada evento después de la inyección de gases, un envase a cada hora durante las primeras seis horas de almacenamiento. El muestreo continuó a las 24 horas de almacenamiento y posteriormente cada 48 horas durante dos semanas.

### 2.3.6 Determinación del color

Se midieron los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  utilizando un espectrofotómetro de mesa (Kónica Minolta CM-5, Japón). Las rebanadas de fruta fueron cortadas a los extremos para ser colocadas en una caja petri de 30 mm. Una vez calibrado el equipo, se introdujo la caja petri con la muestra y a continuación se inició la prueba. Al finalizar se obtuvieron los valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  de la superficie de la fruta. La determinación del color únicamente se realizó a la ensalada envasada en el sistema permeable.



Figura 8. Espectrofotómetro de mesa Kónica Minolta CM-5, Japón.

A partir de los valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  obtenidos con el espectrofotómetro se calculó el índice de oscurecimiento (IO) utilizando las ecuaciones 17 y 18 (Fante y Noreña, 2011).

$$IO = \frac{(x - 0.31)}{0.172} * 100 \quad \text{Ec. 17}$$

$$X = \frac{(a^* + 1.75L^*)}{(5.645L^* + a^* - 3.012b^*)} \quad \text{Ec. 18}$$

Mientras que únicamente con los valores de  $a^*$  y  $b^*$  se calculó el ángulo Hue ( $h_{ab}^*$ ) y el Chroma ( $C^*$ ) mediante las ecuaciones 19 y 20 (Supapvanich, *et al.*, 2011).

$$h_{ab}^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad \text{Ec. 19}$$

$$C^* = [a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad \text{Ec. 20}$$

### 2.3.7 Cinética de oscurecimiento

Los cambios en la calidad de los alimentos generalmente son modelados por cinéticas de orden cero, uno y dos (Van Boekel, 2009), por lo que para modelar el oscurecimiento de la superficie cortada de las manzanas y peras envasadas en atmósferas modificadas se determinó el tipo de cinética al que ajustaba el valor de  $a^*$  por medio del método integral gráfico.

Para determinar el orden de la reacción ( $n$ ) se evaluó el parámetro  $a^*$  de cada uno de los tratamientos utilizando las ecuaciones 21 ( $n = 0$ ), 22 ( $n = 1$ ) y 23 ( $n = 2$ ), eligiendo el orden en función al valor del coeficiente de correlación.

$$a^* = a_0^* - kt \quad \text{Ec. 21}$$

$$\ln a^* = \ln a_0^* - kt \quad \text{Ec. 22}$$

$$\frac{1}{a^*} = \frac{1}{a_0^*} - kt \quad \text{Ec. 23}$$

### **2.3.8 Velocidad de respiración**

El cálculo de la velocidad de consumo de  $O_2$  y la velocidad de producción de  $CO_2$  se llevó utilizando las ecuaciones 8 y 9 para un sistema permeable. De la misma forma se calculó  $R_{O_2}$  y  $R_{CO_2}$  para un sistema estático utilizando las ecuaciones 1 y 2 para este tipo de sistema. El cálculo de  $R_{O_2}$  y  $R_{CO_2}$  se realizó para todos los tiempos en los que se monitoreó la ensalada, sin embargo para la realización del modelo únicamente se consideraron las primeras 24 horas de envasado en el sistema estático debido a la baja permeabilidad al oxígeno y dióxido de carbono del envase, por lo que la concentración de  $CO_2$  al interior del mismo se incrementó rápidamente después de dicho tiempo lo que causó varias fluctuaciones en los resultados.

### **2.3.9 Modelado de la velocidad de respiración**

Originalmente se propuso un modelo para describir el cambio en la velocidad de respiración de la ensalada de manzana-pera en base al principio de cinética enzimática de Michaelis-Menten para describir los cambios en la respiración aerobia de las rebanadas de fruta, el cual plantea que en ausencia de  $O_2$ , la velocidad de respiración depende de la concentración de  $O_2$ . Mientras que la dependencia de la respiración con respecto al  $CO_2$  se basa en una inhibición incompetitiva, la cual describe la inhibición del producto en reacciones donde intervienen múltiples sustratos y productos (Fonseca, *et al.*, 2002). Sin embargo debido a la pérdida de la atmósfera al interior del envase en el sistema permeable, reflejándose en el incremento de la concentración de oxígeno y la disminución de la de dióxido de carbono, no fue posible emplear la teoría de cinética enzimática.

Por lo tanto se generó un modelo de respiración de la ensalada de manzana-pera basada en la teoría de cinética química partiendo de la reacción global que describe la respiración aerobia en las células de frutas frescas utilizando los datos obtenidos de la

ensalada envasada en el sistema estático durante las primeras 24 horas de almacenamiento.

Como la respiración de frutas frescas es un conjunto de reacciones metabólicas, la velocidad de producción de dióxido de carbono puede ser matemáticamente expresada por la ley de cinética química, que ilustra el consumo o formación de especies en una reacción química. Por lo que, análogamente, puede obtenerse un modelo de la respiración en términos de la producción de CO<sub>2</sub> (ecuación 24).

$$R_{CO_2} = k[O_2]^\alpha [CO_2]^\beta \quad \text{Ec. 24}$$

Para obtener los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  de cada tratamiento se linealizó la ecuación 24 y se analizaron los datos experimentales del sistema estático por medio de una regresión lineal múltiple. Debido a que  $\alpha$  y  $\beta$  son valores que sirven como constantes en una reacción, se utilizó su valor promedio para calcular el valor de  $k$  resolviendo esta misma ecuación y utilizando nuevamente los datos experimentales. Cada medición tiene una  $k$  diferente, por lo que el promedio de cada punto se consideró como el valor final de  $k$  (Duan, *et al.*; Wang, *et al.*, 2009).

Una vez estimado el valor de la constante de velocidad de reacción con respecto a la producción de dióxido de carbono, se procedió a evaluar el efecto de la temperatura sobre la cinética de producción de CO<sub>2</sub>. Esto se llevó a cabo por medio de una ecuación tipo Arrhenius (ecuación 25), donde la pendiente de la gráfica coincide con el valor de la energía de activación.

$$\ln k = \ln \delta - \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} \right) \quad \text{Ec. 25}$$

## 2.4 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

Se utilizó un diseño factorial fraccionado con puntos centrales para establecer la interacción y relación entre las variables estudiadas en el sistema permeable, así como para establecer el ajuste de variables al sistema mediante un ANOVA. Por otro lado, también se utilizó un diseño factorial  $2^2$  para analizar la ensalada de manzana-pera envasada en el sistema estático. Lo anterior se llevó a cabo con el apoyo del software estadístico Minitab 16<sup>TM</sup>.

La verificación del modelo se realizó por medio del porcentaje de error relativo promedio (Ravindra y Goswami, 2008).

$$\text{ERP (\%)} = \frac{100}{N} \left( \sum_1^N \frac{|X_i - Y_i|}{X_i} \right) \quad \text{Ec. 27}$$

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 CAMBIOS EN EL COLOR

#### 3.1.1 Parámetros de color L\*, a\* y b\*

En la figura 9 se muestran los cambios de luminosidad en función al tratamiento, mostrándose, que la menor pérdida de luminosidad la presentaron los tratamientos con inyección inicial de 10 % de CO<sub>2</sub> y almacenados a 5 °C.

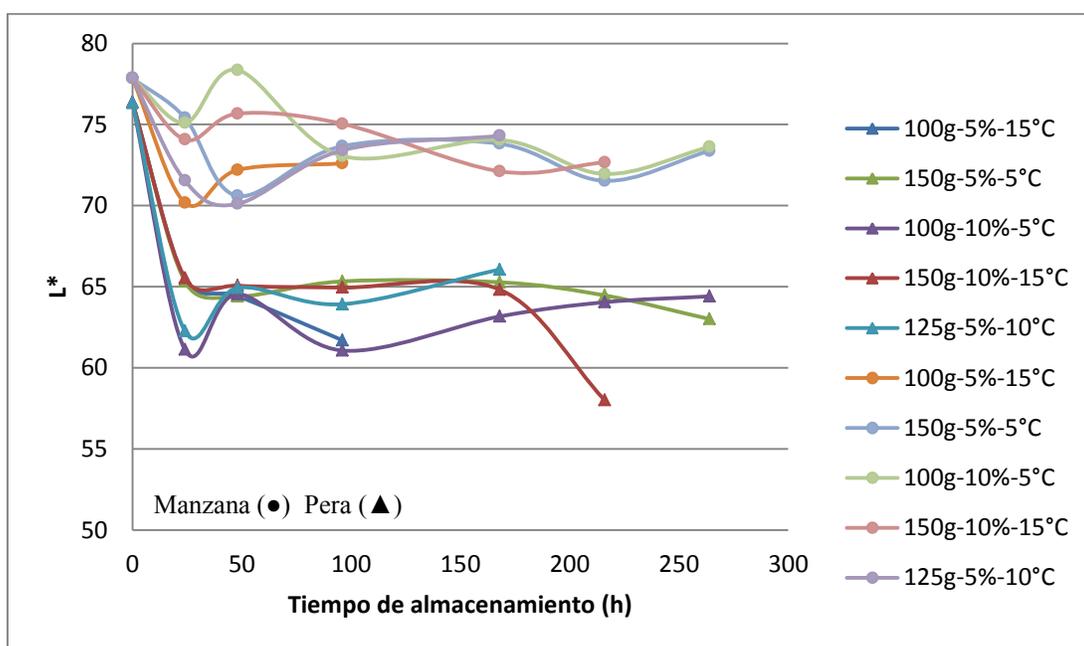


Figura 9. Cambio de la luminosidad (L\*) de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento.

Debido a que las primeras horas de monitoreo fueron con un mismo envase, no fue posible extraer la fruta para obtener los parámetros L\*, a\* y b\*, pues la prueba habría sido completamente destructiva. Los parámetros de color ya no fueron determinados en los envases de fruta que presentaban crecimiento de moho en la superficie de la fruta, lo

que ocurrió en aquellos almacenados a 15 °C después de 96 horas. El efecto de los factores se evaluó hasta este punto para poder tener comparación entre ellos.

El parámetro  $L^*$  es un indicador útil del oscurecimiento de frutos durante el almacenamiento ya sea causado por las reacciones oxidativas de oscurecimiento o por el incremento de la concentración de pigmentos (Rojas-Graü, *et al.*, 2006). En la figura 7 se muestra el cambio del valor de  $L^*$  durante el tiempo de almacenamiento.

En general, éste valor disminuyó en las rebanadas de manzana y pera durante las primeras 24 h de almacenamiento, posteriormente se mantuvo sin cambio en la mayoría de los casos, excepto en el valor de la pera contenida en envases almacenados a 15 °C con 150 g de producto e inyección inicial de CO<sub>2</sub> del 10 % ( $p < 0.05$ ), donde después de 168 h decreció considerablemente. Con respecto a esta última fruta,  $L^*$  decreció entre el 14 – 20 % con respecto al valor inicial, mientras que en el caso de la manzana disminuyó entre el 3 – 10 %. Rocha y Morais (2001) reportaron una pérdida aproximadamente del 6 % de la luminosidad inicial de cubos de manzana fresca cortada, la cual estuvo almacenada a 4 °C durante 7 días en oscuridad.

Con una atmósfera de 5 % CO<sub>2</sub> inicial y almacenada a 15 °C la ensalada comenzó a presentar crecimiento de moho después de 96 h. En este momento, las peras como en las manzanas presentaron el menor valor de  $L^*$  con respecto al resto de los tratamientos. En comparación, la luminosidad de ambas frutas a las 96 h de almacenamiento es alrededor del 3 – 6 % mayor (entre dos y cuatro puntos) al incrementar la concentración inicial de CO<sub>2</sub> al 10 % y manteniendo la misma temperatura, o cuando la temperatura de almacenamiento se disminuye hasta 5 °C aún con la misma atmosfera inicial inyectada.

En la manzana, la inyección de 10 % CO<sub>2</sub> mantiene el valor de  $L^*$ , aun cuando la temperatura de refrigeración varía. Soliva-Fortuny, *et al.* (2001) reportaron que manzana (Golden delicious) fresca cortada mantiene la luminosidad sin cambio durante 30 días en envases de baja permeabilidad al oxígeno y una atmósfera de 100 % N<sub>2</sub>; mientras que

con una atmósfera de 7 % CO<sub>2</sub> y 2.5 % O<sub>2</sub>, el parámetro L\* disminuye los primeros 15 días para después mantenerse constante.

En el caso de las peras, cuando el fruto sufre un corte, éste exhibe una pérdida de la luminosidad en la superficie de la pulpa, así como el desarrollo de una superficie abrasiva (Gorny, *et al.*, 2000). Además la pera es una fruta que se adapta fácilmente al cambio de la atmósfera en la que se encuentra, por lo que en este caso, a las 96 h, la variación de la masa envasada sí tiene efecto sobre L\*, observándose que la disminución de L\* con respecto la disminución de la masa de producto. El mismo comportamiento fue presentado en las rebanadas de manzana. También se ha sugerido que la pérdida de agua durante el almacenamiento puede ser un factor que afecta en la disminución del valor de L\* (Supapvanich, *et al.*, 2011).

La figura 10 muestra la variabilidad de los valores de a\* en función al tratamiento, es decir, la concentración de gases inicial, la masa y la temperatura.

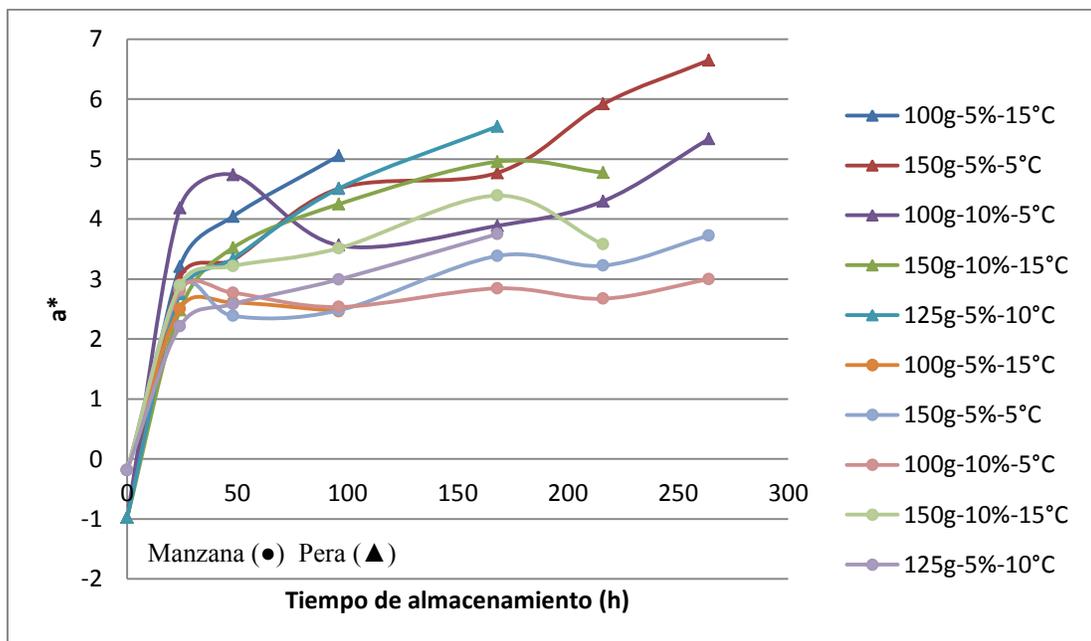


Figura 10. Cambio del parámetro  $a^*$  de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento.

Además de  $L^*$ ,  $a^*$  es otro parámetro importante que influye en el cambio de calor de pulpas de frutas. Este valor ha sido utilizado para monitorear el oscurecimiento de la superficie de manzana cortada al ser una medida del verde relacionado al cambio de color de la pulpa (Rojas-Graü, *et al.*, 2006). El parámetro  $a^*$  se incrementó rápidamente hasta cuatro puntos en las primeras 24 horas de almacenamiento desde un valor negativo hasta valores positivos, lo que significa que hubo un oscurecimiento considerable del tejido de las frutas. La superficie de las rebanadas de pera continuó oscureciéndose durante el resto del almacenamiento ( $p < 0.05$ ), mientras que en el caso de la manzana únicamente en el punto central, donde se envasaron 125 g de producto, se obtuvo el mismo resultado. El resto no mostró cambio significativo ( $p > 0.05$ ) durante el tiempo de refrigeración posterior a las 24 h.

Anteriormente, Gorny *et al.* (2000) reportaron el mismo comportamiento en rebanadas de pera Anjou, las cuales exhibieron mayor oscurecimiento, tomando como indicador los valores de  $a^*$  de la superficie cortada, a lo largo de su almacenamiento a 10 °C. Dicho parámetro se incrementó rápidamente desde valores negativos hasta positivos en los primeros dos días de refrigeración.

Por otro lado, con una masa de 100 g de producto, una inyección inicial de 10 %  $CO_2$  y temperatura de almacenamiento de 5 °C, el valor de  $a^*$  de ambos frutos fue el menor en comparación con el resto de los tratamientos, sin embargo, las rebanadas de pera presentaron mayores fluctuaciones. Se observó mayor efecto debido a la temperatura, pues el valor de  $a^*$  aumentó con respecto al incremento de la temperatura de almacenamiento.

Soliva-Fortuny *et al.* (2001) han reportado que la manzana fresca cortada envasada en películas de media y baja permeabilidad al oxígeno y atmósfera pobre en oxígeno, no presenta cambios significativos en los valores de  $a^*$  y  $b^*$ ; en comparación, en este caso en particular el factor que intervino en el incremento de estos parámetros fue el envase, el cual presentó alta permeabilidad al oxígeno y al dióxido de carbono, por lo que la atmósfera modificada se perdió rápidamente.

La figura 11 muestra la variación de los valores de  $b^*$  durante el tiempo de almacenamiento en función al tratamiento.

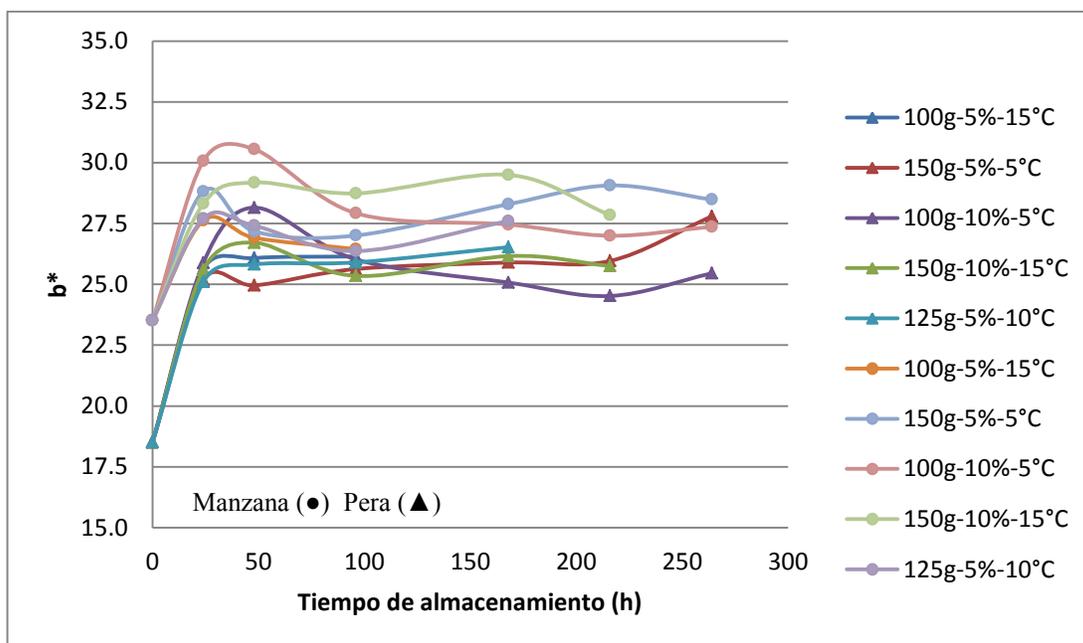


Figura 11. Cambio del parámetro  $b^*$  de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento.

El valor de  $b^*$  es una medida de amarillo en diversos productos, sin embargo no se le asocia con los cambios de color en tejidos de frutas como la manzana y pera. En este caso,  $b^*$  incrementó su valor en el primer día de almacenamiento para después mantenerse sin variación en ambas frutas ( $p > 0.05$ ) durante el resto del tiempo de refrigeración tal y como se aprecia en la figura 9, donde se muestra la evolución de  $b^*$  con respecto al tiempo.

### 3.1.2 Índices de oscurecimiento

En la figura 12 se muestra el cambio en el valor del índice de oscurecimiento durante el tiempo de almacenamiento refrigerado de la ensalada de manzana-pera envasada en atmósferas modificadas.

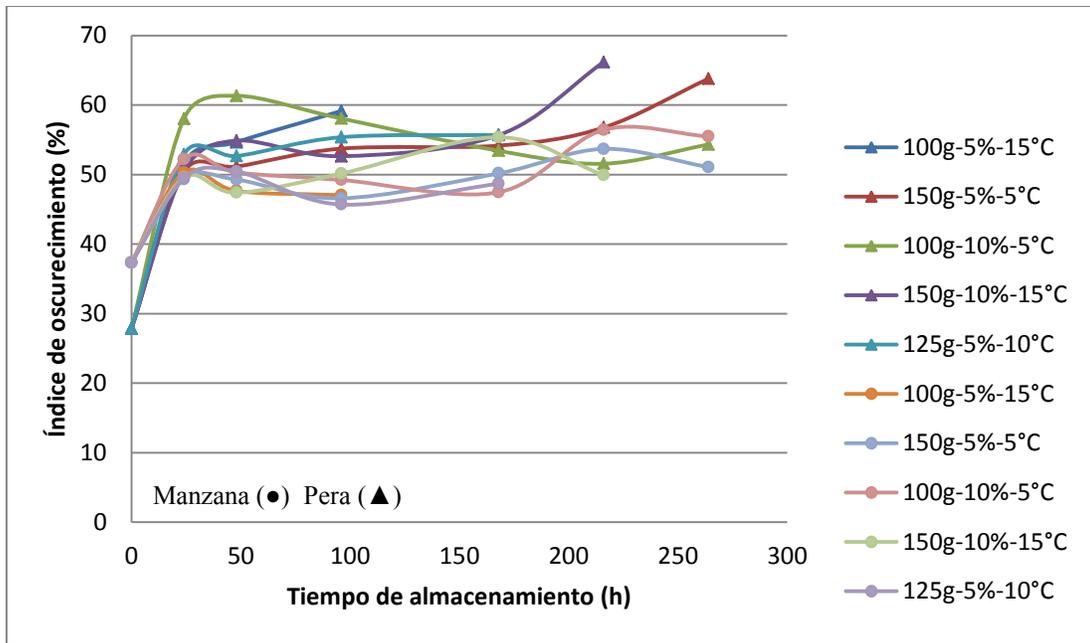


Figura 12. Cambio del índice de oscurecimiento (IO) de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento.

El valor del IO de ambos frutos se incrementó rápidamente a las 24 h de almacenamiento con respecto a su valor inicial, siendo congruente con el incremento y disminución de los parámetros  $a^*$  y  $L^*$ , respectivamente. Este incremento en el IO sugiere un rápido aumento en la proporción de fenoles oxidados durante el almacenamiento de la ensalada. Chung y Moon (2009) reportaron el incremento del IO de manzana fresca cortada en los dos primeros días de almacenamiento y envasada en películas de polietileno para posteriormente mantenerse sin cambio aparente. Por otro lado, tomando en cuenta que la pera es un fruto más delicado que la manzana, y específicamente la variedad Anjou en comparación de otras variedades de pera como Barlett y Bosc, ésta fue más susceptible al oscurecimiento enzimático (Gorny, *et al.*, 2000), consecuentemente la pera presentó mayor incremento en el valor de IO que la manzana.

Las operaciones de procesado mínimo causan la ruptura de las células del tejido del fruto, lo que permite que los sustratos y las enzimas entren en contacto. En este aspecto la polifenol oxidada es la principal enzima responsable del oscurecimiento, por lo que

su actividad se incrementa después del cortado del fruto (Rocha y Morais, 2001). En este aspecto, el índice de oscurecimiento (IO) indica la proporción de fenoles oxidados durante el almacenamiento por medio de la pureza del color café, siendo un parámetro importante en procesos donde el oscurecimiento enzimático, y no enzimático, forman parte de las reacciones de deterioro (Rocha y Morais, 2003).

Después del primer día de refrigeración de la ensalada, el IO de ambos frutos se mantuvo sin cambio significativo ( $p > 0.05$ ), a excepción de aquellos envases con 100 g de producto, con inyección inicial del 10 % de  $\text{CO}_2$  y almacenados a 5 °C. Tomando en cuenta que la atmósfera modificada inicial se perdió rápidamente, lo anterior sugiere que, aun cuando el IO se mantuvo relativamente constante, esto se relaciona con la disminución de la concentración de los compuestos fenólicos, especialmente los difenoles, necesarios para la formación del pigmento café que caracteriza el oscurecimiento enzimático, es decir, la melanina.

Como se mencionó anteriormente, se fueron descartando aquellos envases en los que se observó crecimiento de moho en la superficie del fruto, por lo que hasta las 96 horas fueron muestreados todos los envases de ensalada, y el efecto de todos los tratamientos sobre el IO fue evaluado hasta este punto por medio de un diseño factorial fraccionado.

La figura 13 representa la gráfica de probabilidad normal de los efectos estandarizados del índice de oscurecimiento de las rebanadas de pera, en la cual se muestra que, estadísticamente hablando, no existió efecto significativo de los factores evaluados sobre el IO en este punto de la experimentación. Existió un comportamiento similar en lo que refiere a las rebanadas de manzana. Sin embargo, aun cuando estadísticamente no existió diferencia significativa entre los tratamientos, físicamente fue posible apreciar una variación entre los tratamientos sobre el IO de la pera como se presenta en la figura 14, donde se muestra que al envasar 100 g de producto, la pera presentó mayor oscurecimiento que cuando se envasaron 150 g de ensalada.

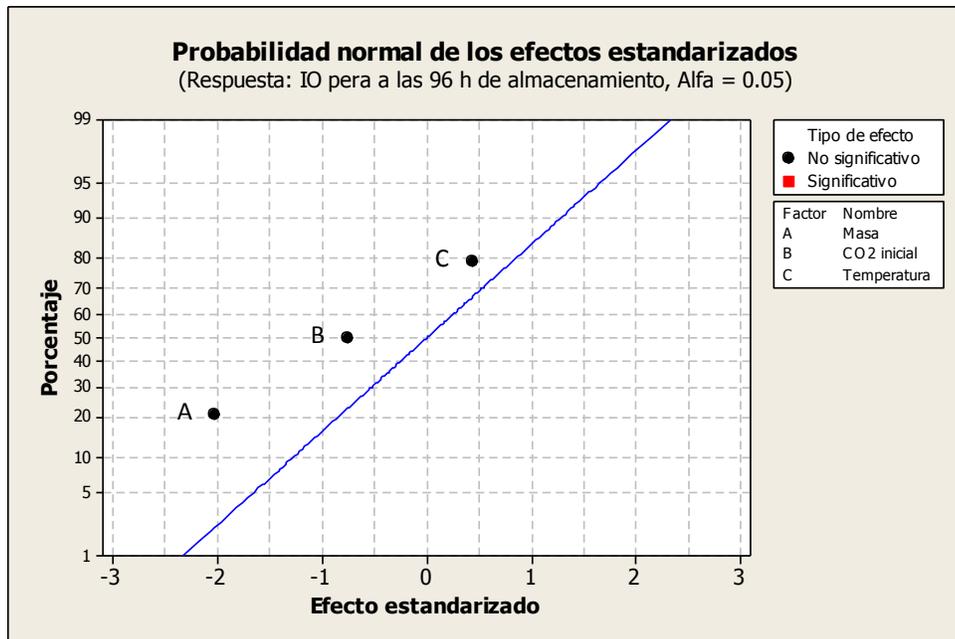


Figura 13. Probabilidad normal de los efectos estandarizados del IO de la pera a las 96 h de almacenamiento.

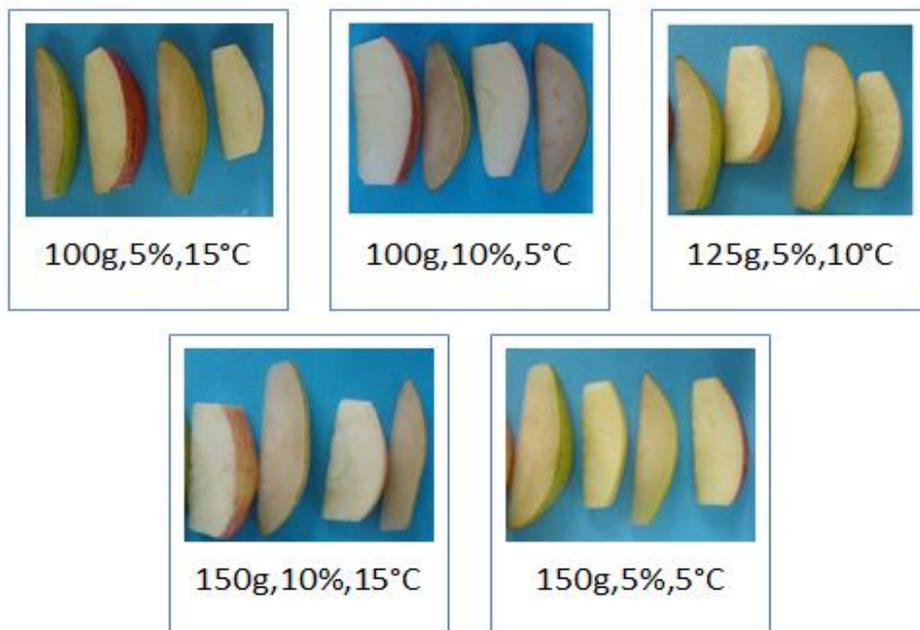


Figura 14. Manzana y pera frescas cortadas con diferentes tratamientos a las 96 h de almacenamiento.

Otro indicador del oscurecimiento de la superficie de manzanas y peras frescas cortadas es el ángulo Hue ( $h_{ab}^*$ ) cuya evolución durante el tiempo de almacenamiento se muestra en la figura 15. El ángulo hue ( $h_{ab}^*$ ) es un ángulo en un círculo de color de  $360^\circ$  donde el  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$  representan los ángulos rojo-morado, amarillo, verde y azul respectivamente (Rocha y Morais, 2003).

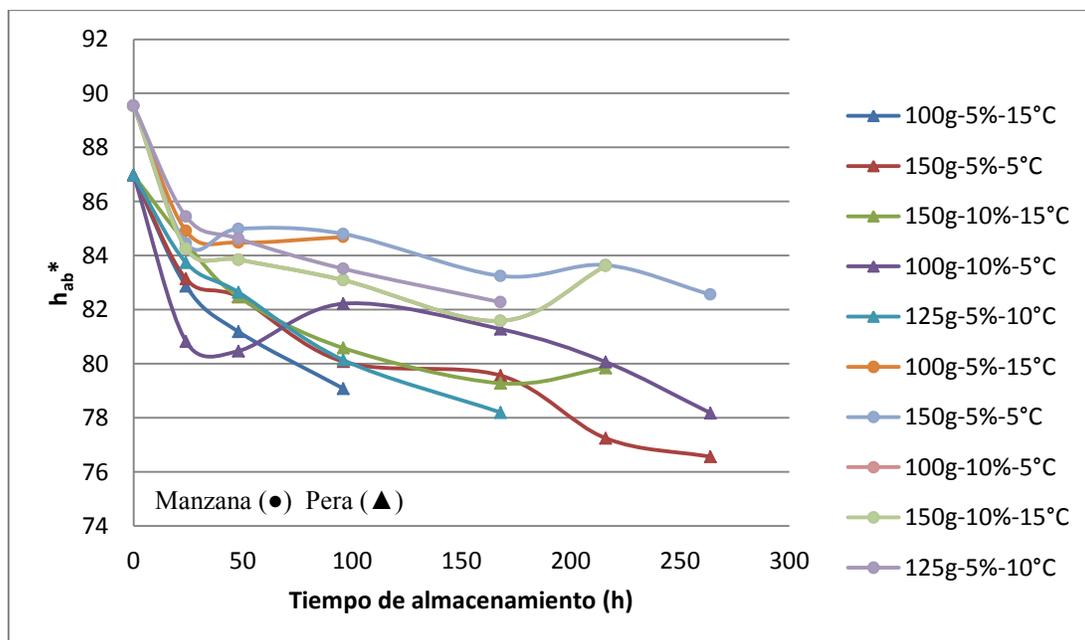


Figura 15. Cambio en el ángulo Hue ( $h_{ab}^*$ ) de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento.

A las 24 h de almacenamiento, el  $h_{ab}^*$  de las rebanadas de manzana disminuyó alrededor del 5.3 % con respecto a su valor inicial (89.54), para después mantenerse sin cambio significativo con respecto al tiempo ( $p > 0.05$ ); mientras que en el caso de la pera fresca cortada este índice disminuyó entre el 2.9 y 7.1 % con respecto a su valor inicial (86.97), y continuó decreciendo después de 264 horas de almacenamiento alcanzando valores de 76.56 en los envases con 150 g de producto, inyección inicial de  $CO_2$  de 5 % y almacenados a  $5^\circ C$ , siendo congruente con el incremento de los valores de  $a^*$ , ya que el ángulo Hue se encuentra en función a éste parámetro.

En la figura 16 se presenta el cambio del Croma ( $C^*$ ) durante el tiempo de almacenamiento refrigerado, que representa la intensidad o la pureza del ángulo Hue (Rocha y Morais, 2003).

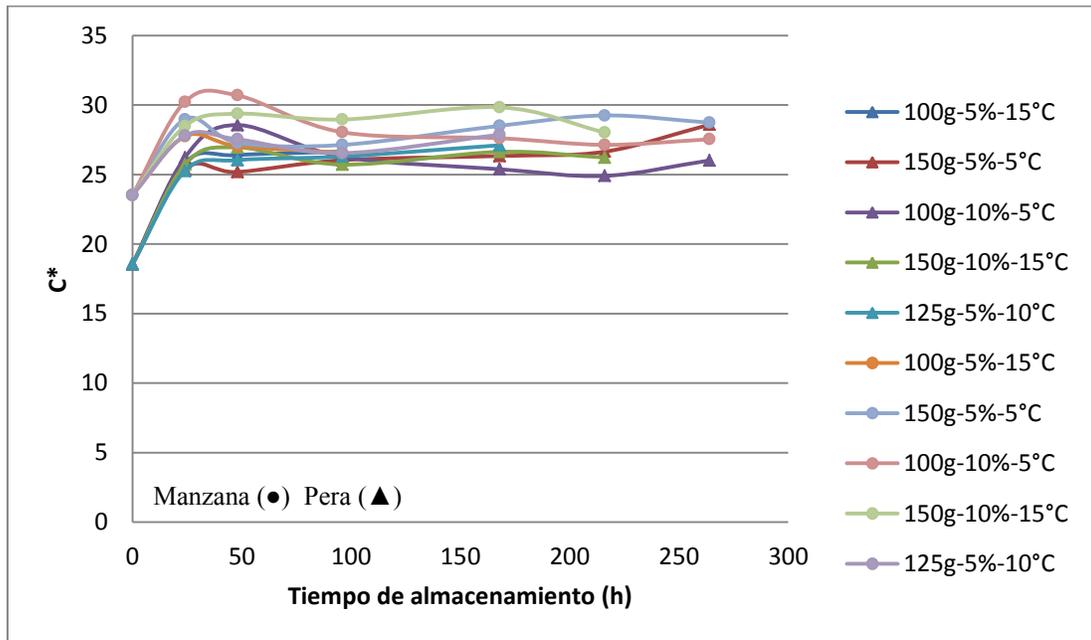


Figura 16. Cambio del Croma ( $C^*$ ) de las rebanadas de manzana y pera durante el almacenamiento.

En este caso los valores de  $C^*$  siguen el mismo perfil con respecto al tiempo al igual que los valores del parámetro  $b^*$ , por lo que igualmente este índice aumentó su valor después de un día desde 23.52 hasta valores que oscilaban entre el 27.74 y 30.22 en el caso de la manzana, mientras que en el otro fruto el Croma fue desde el punto inicial de 18.54 hasta valores entre el 25.25 y 26.22. Un incremento en la saturación (Croma) indica un incremento en la pigmentación total relacionada con la rápida formación de melaninas durante las primeras horas de almacenamiento (Rocha y Morais, 2001).

Después del primer día de almacenamiento el valor de  $C^*$  se mantuvo sin variaciones ( $p > 0.05$ ) durante el resto del tiempo en el que la ensalada de manzana-pera permaneció en refrigeración. Rocha y Morais (2003) reportaron el mismo comportamiento de los

valores de Croma en manzana fresca cortada (variedad Jonagored), incrementándose en los primeros días de almacenamiento a 5 °C.

### 3.2 CINÉTICA DE OSCURECIMIENTO

Se determinaron las constantes relacionadas con la cinética de deterioro de las rebanadas de manzana y pera con el fin de describir el cambio en el indicador de calidad evaluado como una función de las condiciones del proceso. Los datos experimentales de  $a^*$  de ambas frutas se analizaron con las ecuaciones cinéticas de orden cero, primero y segundo por medio del método integral gráfico (Van Boekel, 2008). En la tabla 7 se presentan los valores de la constante de velocidad de reacción ( $k$ ) obtenidos en el análisis de regresión lineal, donde se identifica que la cinética de orden cero puede ser utilizada adecuadamente para el parámetro de color  $a^*$ , cuyo ajuste fue aceptable.

Tabla 7. Ajuste cinético de orden cero del parámetro de color  $a^*$ .

	<b>Tratamiento</b>	<b>k (h<sup>-1</sup>)</b>	<b>a<sub>0</sub><sup>*</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>
Manzana	100g-5%-15°C	0.012583	1.8193	96.6
	150g-5%-5°C	0.007941	1.9248	99.0
	100g-10%-5°C	0.006336	1.9080	98.7
	150g-10%-15°C	0.008431	2.5944	87.4
	125g-5%-10°C	0.010363	2.0124	94.4
Pera	100g-5%-15°C	0.024973	2.7012	98.2
	150g-5%-5°C	0.014871	2.6729	97.8
	100g-10%-5°C	0.008194	3.2717	80.4
	150g-10%-15°C	0.015758	2.3243	97.0
	125g-5%-10°C	0.019392	2.4052	98.2

Lo anterior coincide con lo reportado por Salinas-Hernández, *et al.* (2010), quienes observaron que el cambio de color de mango fresco cortado almacenado a 5 °C, relacionado al oscurecimiento de la pulpa, sigue una cinética de orden cero. Cabe mencionar que la mayoría de los procesos de deterioro de la calidad de los alimentos

almacenados bajo condiciones ambientales controladas pueden describirse con funciones de velocidad de orden cero (Reyes, 2007).

Se ha sugerido que el oscurecimiento enzimático de la superficie de manzana fresca cortada puede ser monitoreada al medir los cambios de  $L^*$  y  $a^*$ , mientras que a los valores de  $b^*$  no se les relaciona con el oscurecimiento (Rojas-Graü, *et al.*, 2006). Debido a que los valores de  $a^*$  presentaron mayor evolución con respecto al tiempo de almacenamiento que el resto de los parámetros e índices de color, éstos fueron utilizados para determinar la cinética de oscurecimiento de la ensalada de fruta fresca. La variación este parámetro de color indica oscurecimiento de la superficie cortada, lo que a su vez, indica la disminución de la calidad de las rebanadas de manzana y pera frescas cortadas.

Las figuras 17 y 18 muestran los efectos principales de la masa del producto, inyección inicial de  $CO_2$  y temperatura de almacenamiento, sobre el valor de la constante de velocidad de reacción en la cinética de oscurecimiento de las rebanadas de pera y manzana respectivamente.

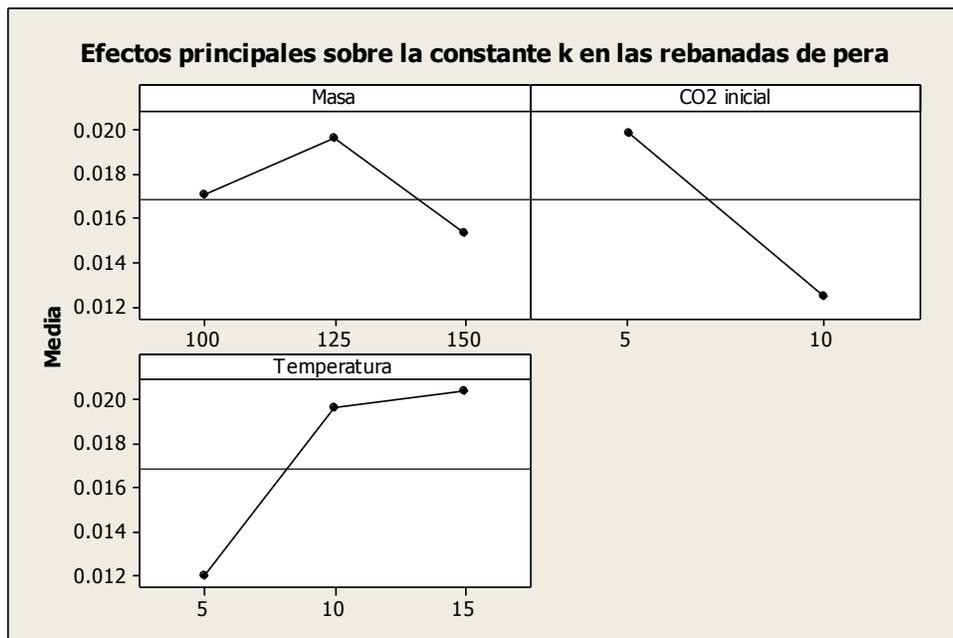


Figura 17. Efectos principales sobre la constante de velocidad de reacción ( $k$ ) en la cinética de oscurecimiento de las rebanadas de pera.

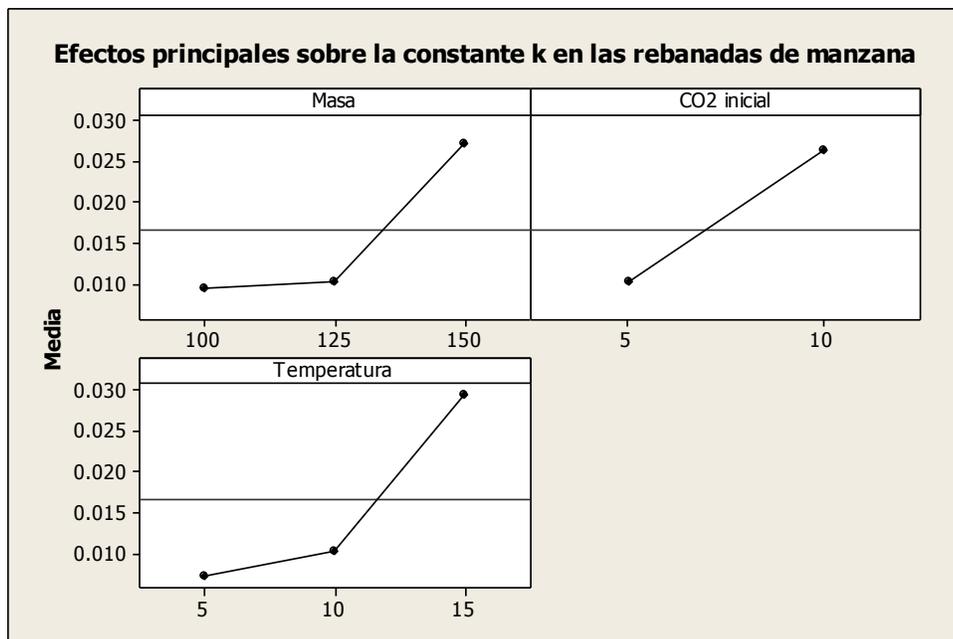


Figura 18. Efectos principales sobre la constante de velocidad de reacción (k) en la cinética de oscurecimiento de las rebanadas de manzana.

En ambas frutas el valor de la constante de velocidad aumentó con el incremento de la temperatura a la que fueron almacenados los envases de fruta fresca cortada; este incremento implica que al aumentar la temperatura del medio de enfriamiento (aire), la degradación del color del tejido de las rebanadas de fruta apareció rápidamente como resultado del incremento de la formación de melaninas.

Por otro lado, la inyección de dióxido de carbono inicial tiene efecto sobre el valor de la constante de velocidad de reacción en ambos frutos. Sin embargo, la diferencia entre ambas frutas radica en que cuando se inyectó 5 % de CO<sub>2</sub>, la pera presentó los mayores valores de la constante de velocidad, mientras que en el caso de la manzana este valor coincide con la inyección del 10 % de CO<sub>2</sub>. Además la pera presentó valores de constante de velocidad de reacción más altos que los de la manzana, lo que puede atribuirse a la alta porosidad de la pera, permitiendo una mayor difusión de oxígeno a los espacios intracelulares del tejido del fruto y favoreciendo las reacciones catalizadas por el grupo de las polifenol oxidasas.

### 3.3 VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN

#### 3.3.1 Sistema permeable

Diversos autores (Lakakul, *et al.*, 1999; Rocculi, *et al.*, 2006; Gomes, *et al.*, 2010) han reportado el comportamiento del O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en sistemas permeables, resultando en el incremento del CO<sub>2</sub> con la disminución del O<sub>2</sub> al interior del envase.

Sin embargo en este caso, la atmósfera modificada se perdió rápidamente debido a posibles fisuras en la película de media barrera utilizada para envasar la fruta, por el mal sellado del envase, e incluso por la elevada permeabilidad a ambos gases. En las figuras 19 y 20 se muestra la pérdida de la atmósfera modificada inicial al interior del envase, representada como el incremento de la presión parcial del oxígeno y la disminución de la presión parcial del dióxido de carbono al interior del envase en las primeras horas de almacenamiento refrigerado.

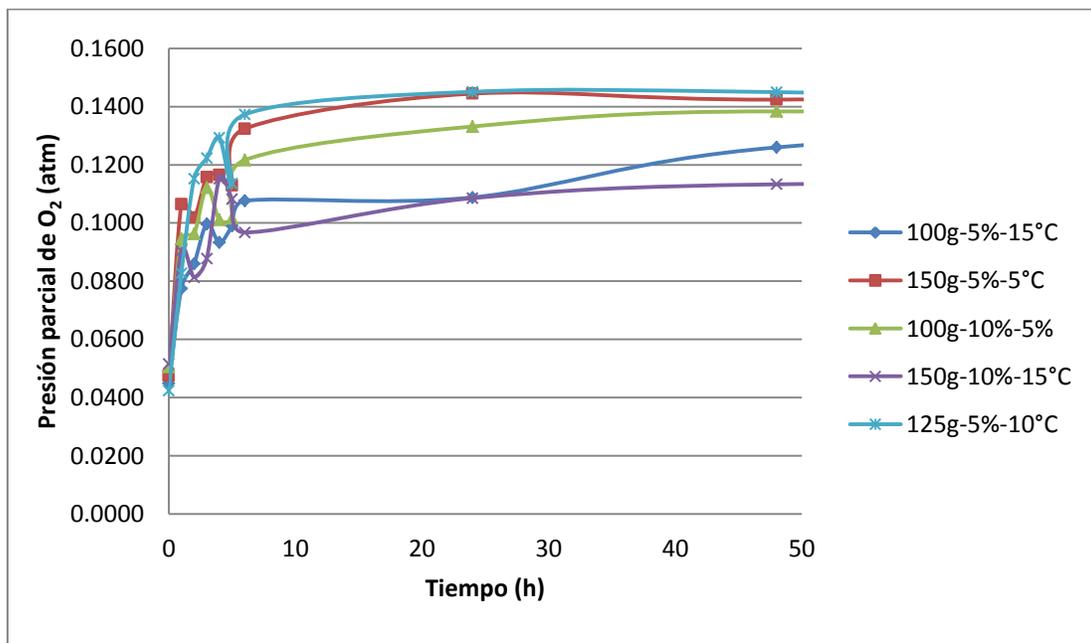


Figura 19. Incremento de la presión parcial de oxígeno al interior del envase.

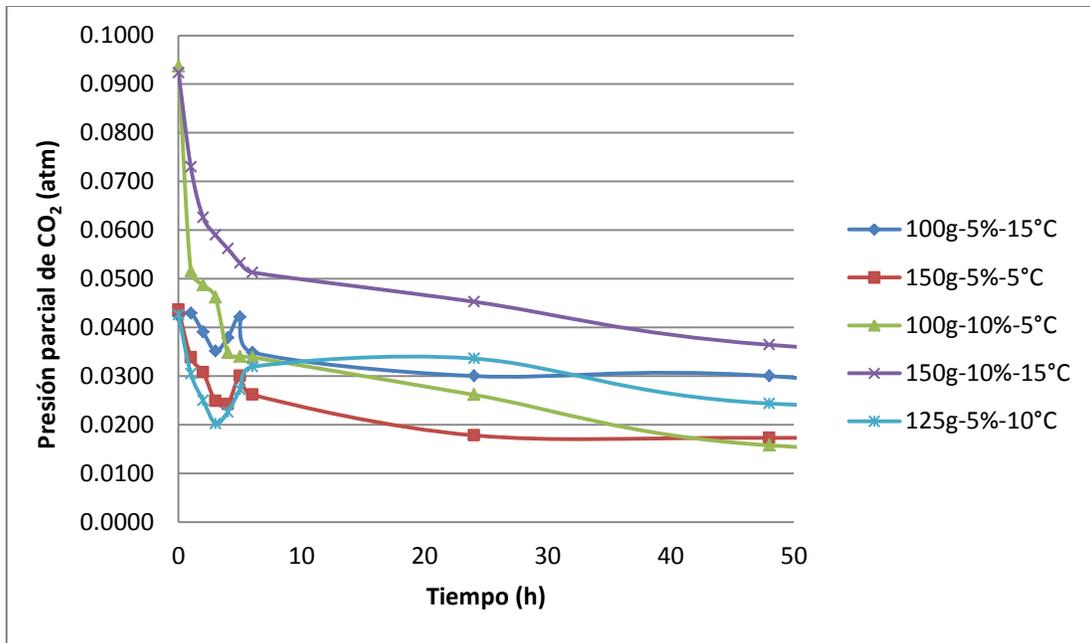


Figura 20. Disminución de la presión parcial de dióxido de carbono al interior del envase.

Sin embargo independientemente de la pérdida de la atmósfera modificada inicial, después de 24 horas la mayoría de los envases de ensalada no presentaron diferencia significativa en la concentración de los gases evaluados ( $p > 0.05$ ), por lo que alcanzaron un equilibrio dinámico debido a la interacción de la respiración del producto, la transpiración del mismo, el intercambio gaseoso a través del material de envasado y la transferencia de calor (Martín Belloso y Oms Oliu, 2005). Únicamente en aquellos envases con 150 g de producto, 10 % de inyección inicial de  $\text{CO}_2$  y almacenados a  $15^\circ\text{C}$  presentaron una pendiente más pronunciada con respecto a la evolución de ambos gases durante el tiempo de almacenamiento.

Se calculó la velocidad respiración de la ensalada de manzana-pera expresada como el consumo de  $\text{O}_2$  y producción de  $\text{CO}_2$  al interior del envase. El cálculo se realizó utilizando las ecuaciones 8 y 9 para un sistema permeable. En la tabla 8 se concentran los valores de la velocidad de respiración para cada uno de los tratamientos reportada como velocidad de consumo de oxígeno y de producción de dióxido de carbono una vez que se alcanzó el equilibrio.

Tabla 8. Velocidad de respiración, sistema permeable.

<b>Tratamiento</b>	<b>Velocidad de consumo de O<sub>2</sub> (m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Velocidad de producción de CO<sub>2</sub> (m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)</b>
100g-5%-15°C	2.6284E-06	6.6778E-06
150g-5%-5°C	9.2415E-07	2.7859E-06
100g-10%-5°C	1.9736E-06	4.6644E-06
150g-10%-15°C	1.5736E-06	5.4148E-06
125g-5%-10°C	1.1414E-06	5.0482E-06

Los mayores valores de velocidad de consumo de oxígeno coinciden con el 100 g de producto envasado, lo que es congruente con el análisis estadístico, que señaló que tanto la masa como la temperatura tienen efecto significativo sobre la  $R_{O_2}$  ( $p < 0.05$ ). Por lo que al envasar 100 g de producto, con inyección inicial de 5 %  $CO_2$  y almacenados a 15 °C se alcanzó el valor máximo de  $R_{O_2}$ , observando así el efecto de la temperatura sobre la velocidad de respiración. Por otro lado, al disminuir la cantidad de producto envasado, se incrementó el espacio libre de cabeza facilitando la difusión de gases en los espacios intercelulares del tejido del fruto lo que intensificó el consumo de oxígeno. Otro factor que posiblemente se involucró en el incremento de la velocidad de consumo de oxígeno fue el crecimiento de moho en la superficie de la fruta después de 96 h de almacenamiento.

Generalmente, la temperatura es reconocida como uno de los factores externos importantes que pueden afectar la actividad respiratoria de varios productos frescos (Wang, *et al.*, 2009). En este aspecto, el factor que tuvo efecto sobre la velocidad de producción de dióxido de carbono fue la temperatura ( $p < 0.05$ ) tal y como se muestra en la tabla 8, en la cual se aprecia que los mayores valores de  $R_{CO_2}$  se observaron a 15 °C, mientras que los menores coinciden con la temperatura de refrigeración más baja (5 °C). Por otro lado, después de 24 horas, debido a la pérdida de la atmósfera modificada, la concentración de dióxido de carbono no tuvo efecto significativo sobre el  $R_{CO_2}$  ( $p > 0.05$ ).

### 3.3.2 Sistema estático

En las figuras 21 y 22 se muestra la variación de la composición de la atmósfera en el espacio libre de cabeza al interior del envase de alta barrera con respecto al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Como se esperaba, en todos los casos existió la disminución de la concentración de O<sub>2</sub> al interior del envase, así como el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub>.

Se graficaron únicamente los valores hasta las primeras 24 horas de almacenamiento ya que en este punto se perdió la atmósfera óptima de almacenamiento, la cual ocurre justo por encima del límite inferior de oxígeno (LIO), en el cual la respiración aerobia se encuentra en sus niveles más bajos sin que comience la respiración anaerobia. Se tomó como referencia el LIO de la manzana, que varía entre el 0.7 y 1.8 % para todas las variedades de este fruto (Rocculi, *et al.*, 2006), por lo que se tomó el valor de 1 % como el nivel de oxígeno en el espacio libre de cabeza como límite racional de la respiración aerobia.

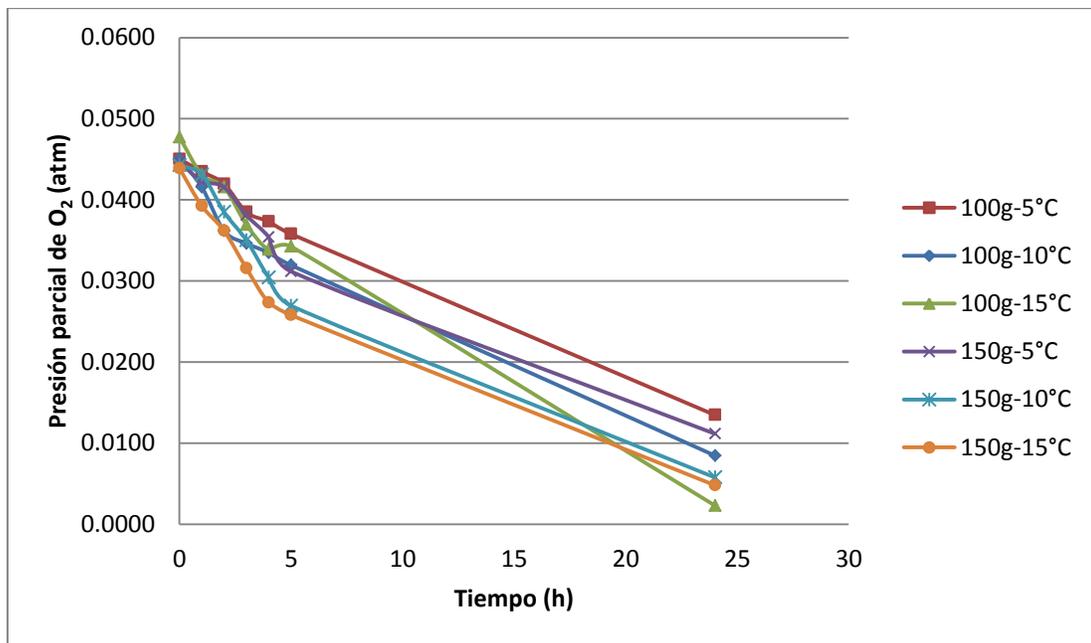


Figura 21. Variación de la presión parcial de O<sub>2</sub> al interior del envase, sistema estático.

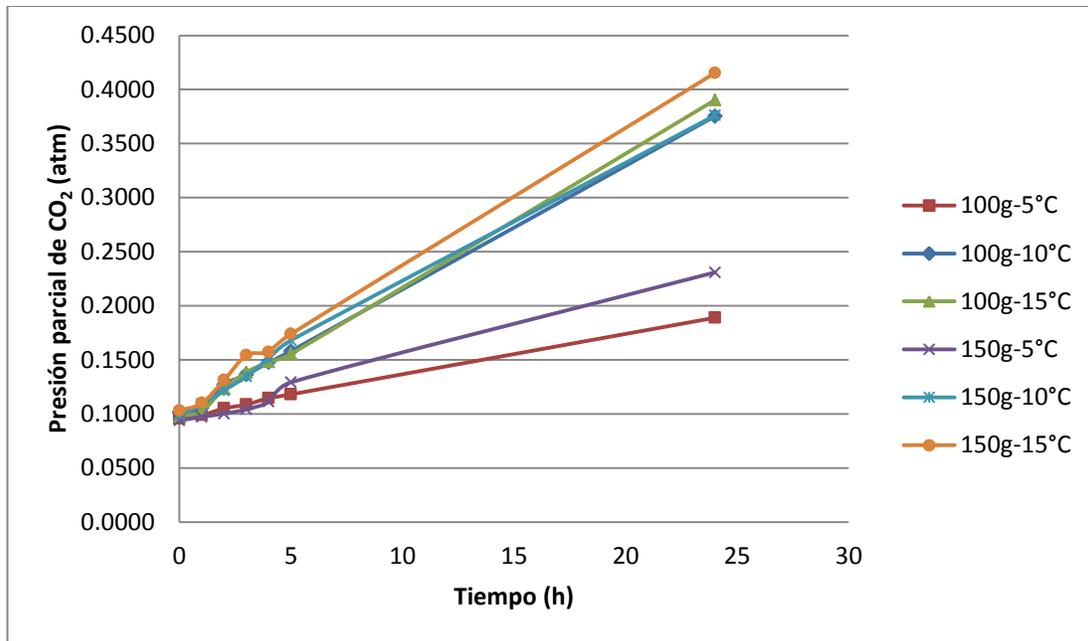


Figura 22. Variación de la presión parcial de CO<sub>2</sub> al interior del envase, sistema estático.

Durante las operaciones de procesado mínimo, la fruta sufre un estrés que causa que la velocidad de respiración se eleve con respecto al tiempo hasta alcanzar un valor máximo, para después comenzar a disminuir hasta mantenerse si cambio (Torrieri, *et al.*, 2009) coincidiendo con la estabilización de las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> al interior del envase. En este caso no se alcanzó la respiración máxima, y únicamente se observó el continuo incremento o decremento de ambos gases, aunado con el fenómeno descrito anteriormente. Esto puede deberse que en la etapa de senescencia, los frutos climatéricos incrementan su respiración para obtener mayor energía para continuar con sus procesos metabólicos (Fonseca, *et al.*, 2002), lo que se refleja tanto en el mayor consumo de oxígeno como en la mayor producción de dióxido de carbono.

Utilizando las ecuaciones 1 y 2 se calculó una velocidad de consumo de oxígeno y de producción de dióxido de carbono promedio. En la tabla 9 se concentran los valores de R<sub>O<sub>2</sub></sub> y R<sub>CO<sub>2</sub></sub> para cada uno de los tratamientos en el sistema estático.

Tabla 9. Velocidad de respiración, sistema estático.

Tratamiento	Velocidad de consumo de O <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Velocidad de producción de CO <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )
100g-10%-5°C	1.26905E-05	3.0293E-05
100g-10%-10°C	1.69930E-05	7.8439E-05
100g-10%-15°C	1.85700E-05	8.1952E-05
150g-10%-5°C	1.01511E-05	2.4674E-05
150g-10%-10°C	1.42025E-05	5.3890E-05
150g-10%-15°C	1.45015E-05	5.7537E-05

Tanto la temperatura como la masa tuvieron efecto significativo sobre R<sub>O<sub>2</sub></sub> y R<sub>CO<sub>2</sub></sub> (p<0.05). Cuando los envases fueron almacenados a 15 °C la velocidad de consumo de oxígeno y de producción de dióxido de carbono alcanzó sus mayores valores, y éstos fueron decreciendo con respecto a la disminución de la temperatura de refrigeración. Por otro lado, estos valores también se ven influenciados por la masa del producto, ya que el envasado de 150 g de fruta se refleja en una menor velocidad de respiración.

Anteriormente, Rocculi *et al.* (2006) determinaron la velocidad de consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono de manzana fresca cortada (variedad Golden Delicious) envasada en atmósfera modificada, la cual se encontró entre 14.7E-5 – 3.0E-5 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> y 1.11E-7 – 2.07E-7 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> respectivamente. En 2009, Torrieri, *et al.*, también calcularon la R<sub>O<sub>2</sub></sub> de esta misma fruta (variedad Annaurca) a tres temperaturas diferentes, resultando ser 2.5 ± 0.3E-6 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> a 5 °C, 5.8 ± 0.1E-6 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> a 10 °C y 10.4 ± 0.9E-6 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> a 20 °C. Posteriormente, Gomes, *et al.* (2010) reportaron la R<sub>O<sub>2</sub></sub> y R<sub>CO<sub>2</sub></sub> de pera fresca cortada (variedad Rocha) a diferentes temperaturas (5, 10 y 15 °C), encontrando valores entre 5.98E-6 – 3.59E-6, 7.98E-7 – 9.77E-6, y 1.79E-6 – 1.89E-5 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> con respecto al oxígeno respectivamente; mientras que R<sub>CO<sub>2</sub></sub> osciló entre 1.93E-6 – 6.96E-6, 3.58E-6 – 1.65E-5, y 6.34E-6 – 3.28E-5 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> a las mismas temperaturas.

Los valores calculados de la velocidad de respiración promedio reportados en la tabla 9 son ligeramente mayores que los reportados por los autores anteriores; sin embargo, considerando que esta velocidad involucra la respiración de ambos frutos, y que cada uno de ellos presenta una velocidad de respiración diferente, se considera que los resultados obtenidos son aceptables.

### **3.4 MODELADO DE LA VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN**

El modelado de la velocidad de respiración se realizó utilizando los datos del sistema estático y considerando únicamente las primeras 24 h de almacenamiento, en las cuales se mantuvo la atmósfera modificada óptima en función al LIO.

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  fueron estimados para cada masa de producto envasado en el sistema estático, siendo 2.3346 y 4.2365 respectivamente para 100 g de producto envasado, y 2.3278 y 4.0393 para 150 g. Al ser la respiración una reacción compleja, en la que no se observa una reacción neta, el orden de reacción no es un número entero como en reacciones más simples (Duan, *et al.*, 2009), lo que indica que la respiración de frutos es una reacción química que comprende varios pasos.

En 2009 Duan, *et al.* reportaron que la estimación de  $\alpha$  y  $\beta$  arrojaba valores decimales menores a la unidad, asociado a que el proceso respiratorio es una reacción típica con un mecanismo de reacción complicado. Estos estudios fueron realizados con frutas frescas (carambola y guayaba), mientras que en esta investigación el orden de reacción con respecto al  $O_2$  y  $CO_2$  se estimó en un sistema con fruta fresca cortada, por lo que, aun cuando los valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  en fruta fresca cortada fueron de tipo decimal, éstos fueron de mayor magnitud que aquellos correspondientes a fruta fresca. Es importante considerar que se partió de una atmósfera modificada con inyección inicial de 10 % de  $CO_2$ , 5 % de  $O_2$  y compensándola con  $N_2$ , mientras que en trabajos anteriores realizaron la evaluación donde la atmósfera inicial era aire y posteriormente la modificación de la atmósfera al interior del envase se llevó a cabo de forma pasiva.

El significado físico del orden de reacción, tomando al oxígeno como ejemplo, es que cuando se incrementa al doble la concentración de oxígeno alrededor de las rebanadas de manzana y pera frescas cortadas, la velocidad de respiración aumentará alrededor de 5.0441 veces, lo que equivale a  $2^{2.3346}$ .

Una vez que se calcularon los valores de las constantes  $\alpha$  y  $\beta$ , se estimó el valor de la constante de velocidad de reacción ( $k$ ) que aparecerá en el modelo (ecuación 24), cuyos valores se agrupan en la tabla 10, mientras que en la figura 23 se muestran los efectos principales de la masa del producto envasado y la temperatura sobre el valor de  $k$  en la producción de  $\text{CO}_2$ .

Tabla 10. Constante de velocidad de reacción ( $k$ ) en el modelo de la velocidad de producción de  $\text{CO}_2$ .

<b>Masa (g)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>K (h<sup>-1</sup>)</b>
100	5	8.1583E-12
	10	1.0335E-11
	15	1.5300E-11
150	5	9.7216E-12
	10	1.1275E-11
	15	1.4044E-11

Se encontró que el valor de la constante de velocidad de reacción no difiere entre la cantidad de producto envasado ( $p > 0.05$ ). Sin embargo, la temperatura sí tiene efecto significativo sobre esta constante, observando que el valor de  $k$  aumenta con respecto al incremento de la temperatura de almacenamiento, lo que permite identificar a la temperatura como un factor externo importante que afecta la velocidad de producción de  $\text{CO}_2$  en frescos y frescos cortados durante el tiempo de almacenamiento, ya que este gas incrementa su solubilidad en el tejido del fruto conforme disminuye la temperatura. Este comportamiento también fue observado por Ravindra y Goswami (2008) en mago fresco, Wang, *et al.*, (2009) en guayaba, y Gomes, *et al.* (2010) en pera fresca cortada, entre otros.

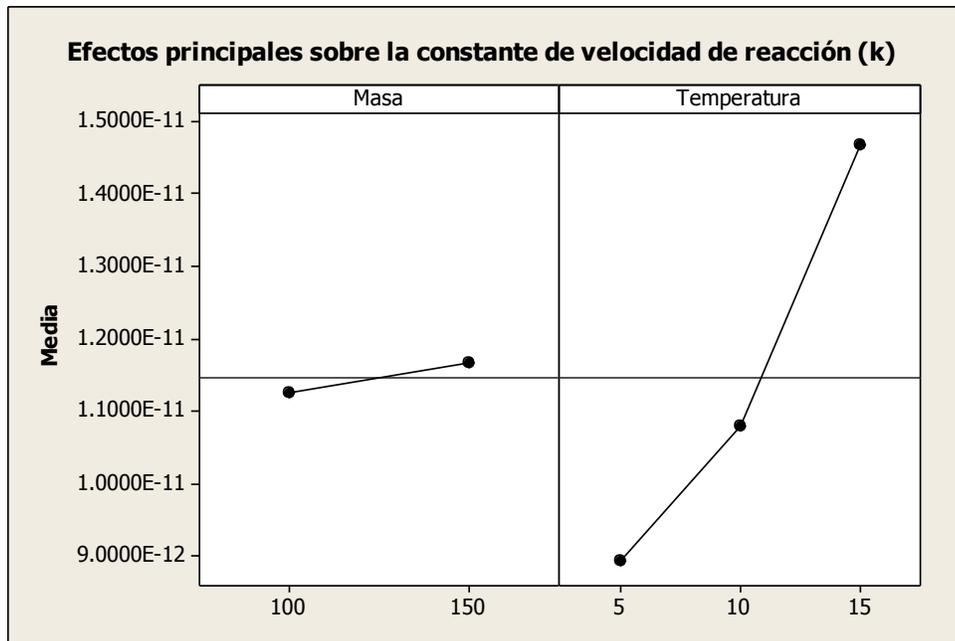


Figura 23. Efectos principales sobre la constante de velocidad de reacción (k) en la producción de dióxido de carbono.

Se evaluó la constante de velocidad de reacción como una función de la temperatura a la que fueron refrigerados los envases de ensalada y utilizando una ecuación tipo Arrhenius (ecuación 25). En la figura 24 se muestran las gráficas tipo Arrhenius obtenidas para cada caso, mostrando buen ajuste a esta relación ( $R^2 = 0.9770$  y  $0.9852$ ).

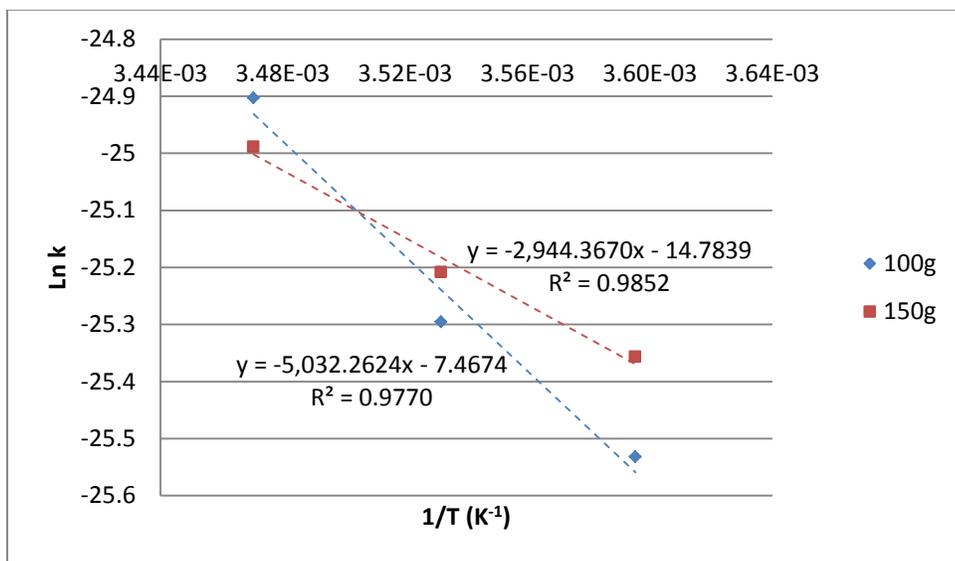


Figura 24. Gráfica tipo Arrhenius para la estimación de la energía de activación.

Esta relación se determinó al graficar el logaritmo natural del parámetro del modelo, es decir  $k$ , con respecto al inverso de la temperatura en unidades absolutas. De esta forma se obtuvo el valor de la energía de activación ( $E_a$ ) y el factor pre-exponencial ( $\delta$ ) por medio de una regresión lineal. Esto se hizo para cada una de las masas de producto envasado. La energía de activación se obtuvo entonces a partir de la pendiente de la línea recta, y cuyos valores fueron  $41.8385 \text{ kJ mol}^{-1}$  y  $24.4797 \text{ kJ mol}^{-1}$  para 100 y 150 g de producto envasado respectivamente.

Aproximadamente el 75 % de los productos hortofrutícolas la  $E_a$  de la respiración se encuentra en rangos entre  $50$  y  $80 \text{ kJ mol}^{-1}$ , aunque algunos productos tienen una sensibilidad a la temperatura fuera de este rango ( $E_a < 50 \text{ kJ mol}^{-1}$ ,  $E_a > 80 \text{ kJ mol}^{-1}$ ), lo que sugiere que el proceso respiratorio de algunos productos frescos es muy sensible a la temperatura, mientras que otros no comparten esta misma sensibilidad (Breaudy, 2007). Mahajan y Goswami (2001) reportaron que la energía de activación con respecto a la velocidad de respiración de manzana fresca (variedad Red Delicious) almacenada en un rango de temperatura de  $0$  a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , la cual resultó  $21.08 \text{ kJ mol}^{-1}$  con respecto al  $\text{CO}_2$ . Los valores estimados en esta investigación se encuentran por encima de este valor, sin embargo hay que considerar que se evaluó fruta fresca cortada.

Aun cuando la  $E_a$  se deriva de la constante de velocidad de reacción ( $k$ ), su significado físico es similar, y para cualquier temperatura desconocida, el valor de la constante  $k$  puede ser determinada a partir de la ecuación de Arrhenius al conocer el valor del factor pre-exponencial y el valor de la energía de activación.

Por lo tanto, al integrar la energía de activación al modelo basado en cinética química (ecuación 25), se obtuvo un modelo global de la velocidad de respiración de manzana y pera frescas cortadas envasadas en un sistema estático reportada como la velocidad de producción de dióxido de carbono, expresado en términos de la temperatura absoluta y la variación de la concentración volumétrica de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  al interior del envase para 100 g (ecuación 26) y 150 g (ecuación 27) de producto envasado.

$$R_{CO_2} = (5.7141E^{-4})e^{\left(\frac{-5032.26}{T}\right)}[O_2]^{2.3326}[CO_2]^{4.2365} \quad \text{Ec. 26}$$

$$R_{CO_2} = (3.7969E^{-7})e^{\left(\frac{-2944.37}{T}\right)}[O_2]^{2.3278}[CO_2]^{4.0393} \quad \text{Ec. 27}$$

### 3.5 VERIFICACIÓN DEL MODELO

La verificación del modelo se realizó calculando la velocidad de producción de dióxido de carbono utilizando los datos experimentales de la variación de ambos gases con respecto al tiempo de cada uno de los eventos con los que se evaluó el sistema estático, y se comparó con los valores experimentales por medio del porcentaje de error relativo promedio (ERM %).

En la figura 25 se muestran los valores calculados (C) de  $R_{CO_2}$  y los valores obtenidos durante la experimentación (E) de la ensalada de manzana-pera con respecto al tiempo de almacenamiento.

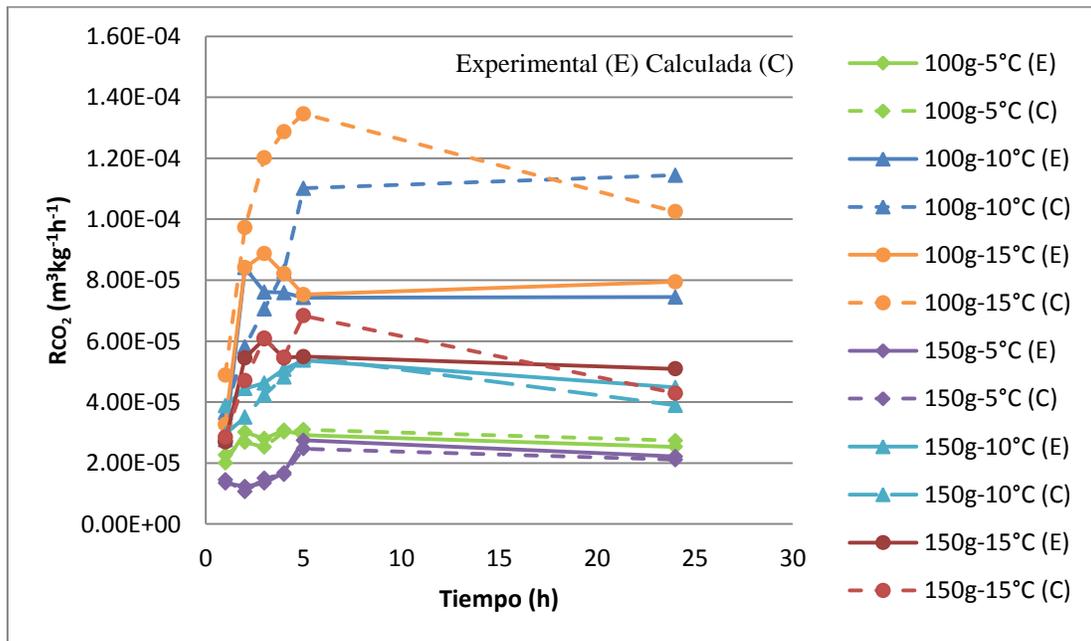


Figura 25. Variación de la velocidad de producción de  $CO_2$  experimental y calculada.

De acuerdo a Ravindra y Goswami (2008) cuando el valor del ERM % es menor al 10 % se considera que el modelo se ajustó exitosamente, entre 10 - 20 % el ajuste es aceptable, mientras que más del 20 % el modelo no es satisfactorio para fines prácticos.

En este caso el modelo no tuvo un ajuste totalmente exitoso (menor al 10 %), tal y como se observa en la figura 23, ya que en aquellos envases con 100 g de producto y almacenados a 10 y 15 °C fue mayor porcentaje de error relativo (por encima del 30%), posiblemente debido a que al envasar menor cantidad de producto, el espacio libre de cabeza era mayor, por lo que la variación de la concentración de los gases fue mayor. En el resto de los tratamientos los valores del ERM % oscilaron entre el 10.45 y 19.32 %, por lo que hay que tomar en cuenta que la precisión de los parámetros calculados en el modelo dependen de la incertidumbre durante la experimentación, la cual proviene de las variaciones biológicas del producto.

Otra posible razón de la falta de ajuste es el rápido desarrollo de un metabolismo fermentativo por una caída excesiva de la concentración de O<sub>2</sub> hasta niveles en que la provisión de energía por medio aeróbico deja de ser suficiente para la actividad metabólica y se produce una transición a una provisión energética por medio anaeróbico (Valle-Guadarrama, *et al.*, 2009), y este tipo de mecanismo no se considera en el modelo utilizando cinética química, ya que éste parte de la reacción de la oxidación de la glucosa en la respiración aerobia.

## CONCLUSIONES

Mediante los cambios de color de la superficie de la manzana y pera fresca cortada fue posible evaluar la efectividad de la atmósfera modificada sobre la conservación de la ensalada de manzana-pera determinando los cambios en el índice de oscurecimiento, ángulo Hue y Cromo. La conservación del color de las frutas se debió tanto a la temperatura de almacenamiento como a la disminución de los compuestos fenólicos necesarios para la formación de la melanina en la reacción de la polifenol oxidasa. Con base en los cambios en el parámetro de color  $a^*$  se determinó la cinética de oscurecimiento de las rebanadas de manzana y pera, resultando ser de orden cero para ambas frutas.

Se determinó la variación de la presión parcial de oxígeno y dióxido de carbono al interior del envase en función a la masa del producto envasado, la inyección inicial de  $CO_2$  y la temperatura de almacenamiento, esto para estimar la velocidad de respiración en un sistema permeable y sistema estático, cuyos valores se encuentran en el rango reportado anteriormente por diversos autores para estas frutas en forma individual, observándose un efecto de la temperatura sobre la velocidad de consumo de oxígeno y de producción de dióxido de carbono.

Se desarrolló un nuevo modelo para predecir la velocidad de respiración reportada como producción de dióxido de carbono de la ensalada de manzana-pera. El modelo integra los efectos de la temperatura de almacenamiento y la modificación de la atmósfera al interior del envase en una ecuación global. La verificación de las ecuaciones obtenidas para cada cantidad de producto envasado, comparando los valores calculados con los experimentales en términos del porcentaje de error relativo promedio, indica que el modelo es aceptable. La importancia de este trabajo radica en que existen pocos modelos de la velocidad de respiración de fruta fresca cortada, pero no existen modelos para mezclas de dos o más frutas.

En esta investigación se demostró la importancia del modelado de la velocidad de respiración de frutas frescas cortadas cuando se encuentran frente a la modificación de la atmósfera al interior del envase y considerado los parámetros más importantes: la temperatura y la concentración de gases al interior del envase, así como la permeabilidad al oxígeno y dióxido de carbono de la película empleada, siendo éste un factor clave en la reducción de la actividad respiratoria del producto para la conservación de la calidad del mismo. Esto es un previo para la optimización del envasado de una ensalada de manzana-pera en atmósferas modificadas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Artés, F. (2006). El envasado en atmósfera modificada mejora la calidad de consumo de los productos hortofrutícolas intactos y mínimamente procesados en fresco. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 7, 61-85.
- Arthey, D. y Ashurst, T. (1997). *Procesado de frutas*. Zaragoza: Acribia.
- Balla, C. y Farkas, J. (2006). Minimally processed fruits and fruit products and their microbiological safety. En Y. Hui (Ed.), *Handbook of Fruits and Fruit Processing* (págs. 115-128). U.S.A.: Blackwell Publishing.
- Barceló, J., Nicolás, G., Sabater, B., y Sánchez, R. (2001). *Fisiología vegetal*. Madrid: Pirámide.
- Breaudy, R. (2007). MAP as a basis for active packaging. En C. Wilson (Ed.), *Intelligent and Active Packaging for Fruits and Vegetables* (págs. 31-55). U.S.A: CRC Press.
- Chung, H.-S. y Moon, K.-D. (2009). Browning characteristics of fresh-cut 'Tsugaru' apples as affected by pre-slicing storage atmospheres. *Food Chemistry*, 114, 1433-1437.
- CODEX STAN 299. (2010). Norma del Codex para las manzanas.
- Côme, D. y Corbineau, F. (2001). Bases de la fisiología postcosecha de las hortalizas. En Y. Tirilly, y C. Bourgeois (Ed.), *Tecnología de las Hortalizas* (págs. 215-231). Zaragoza: Acribia.
- Duan, H.-W., Wang, Z.-W. y Hu, C.-Y. (2009). Development of a simple model based on chemical kinetics parameters for predicting respiration rate of carambola fruit. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 2153-2160.

- Fante, L. y Noreña, C. (2011). Enzyme inactivation kinetics and colour changes in garlic (*Allium sativum* L.) blanched under different conditions. *Journal of Food Engineering*, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.08.024.
- FAO. (2002). Tabla de composición de alimentos de América Latina. Recuperado el 22 Septiembre de 2011, de Oficina Regional para América Latina y el Caribe: <http://www.rlc.fao.org/es/bases/alimento/>
- Fonseca, S. C., Oliveira, F. A. y Brecht, J. K. (2002). Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *Journal of Food Engineering*, 52, 99-119.
- García, E., Gago, L. y Fernández, J. (2006). *Tecnologías de envasado en atmósfera protectora*. Madrid: ELEC Industria Gráfica.
- Gomes, H., Beaudry, R., Almeida, D. y Malcata, X. (2010). Modelling respiration of packaged fresh-cut 'Rocha' pear as affected by oxygen concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 96, 74-79.
- González Buesa, J., Venturini Crespo, M. y Oria Almudi, R. (2003). Proceso de elaboración de frutas de la IV gama: ejemplo práctico. En M. Lobo, y M. González (Ed.), *Productos Hortofrutícolas Mínimamente Procesados* (págs. 79-93). España: Instituto Canario de Investigaciones Agrarias.
- Gorny, J., Cifuentes, R., Hess-Pierce, B. y Kader, A. (2000). Quality-changes in fresh-cut pear slices as affected by cultivar, ripeness stage, fruit size, and storage regime. *Journal of Food Science*, 65(3), 541-544.
- Guevara, J. (2010). *Empacado de alimentos*. México: Trillas.
- Guillaume, C., Guillard, V. y Gontard, N. (2011). Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables: modeling approach. En O. Martín-Belloso, y R. Soliva-Fortuny (Ed.), *Advances in Fresh-cut Fruits and Vegetables Processing* (págs. 255-284). U.S.A.: CRC Press.

- Hertog, M. y Banks, N. (2000). Improving modified atmosphere packaging through conceptual models. En L. Tijssens, M. Hertog, y B. Nicolai (Ed.), Food Process Modelling (págs. 289-311). U.S.A.: CRC Press.
- Infoagro. (2010). El cultivo de la pera. Recuperado el 6 de septiembre de 2011, de Infoagro: [http://www.infoagro.com/frutas/frutas\\_tradicionales/peras.htm](http://www.infoagro.com/frutas/frutas_tradicionales/peras.htm)
- James, J. y Ngarmak, T. (2010). Processing of fresh-cut tropical fruits and vegetables: A technical guide . Bangkok: FAO Regional Office for Asia and the Pacific.
- Kader, A. (2011). Tecnología Postosecha de Cultivos Hortofrutícolas. California: ANR Publicaciones.
- Lakakul, R., Beaudry, R. y Hernández, R. (1999). Modeling respiration rate of apple slices in modified-atmosphere packages. Journal of Food Science, 64, 105-110.
- Lamikanra, O. (2002). Fresh-cut fruits and vegetables: science, technology and market. U.S.A.: CRC Press.
- Laurence, L., Arul, J. y Lencki, R. (1996). A review of modified atmosphere packaging and preservation of fresh fruits and vegetables: physiological basis and practical aspects-Part II. Packaging Technology and Science, 9, 1-17.
- Lee , D., Yam, K. y Piergiovanni, L. (2008). Food Packaging Science and Technology. U.S.A.: CRC Press.
- Lee, L., Arult, J. y Lencki, R. (1996). A review on modified atmosphere packaging and preservation of fresh fruits and vegetables: physiological basis and practical aspects-Part II. Packaging Technology and Science, 9, 1-17.
- López, A. (2003). Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas. Del campo al mercado. Roma: Boletín de servicios agrícolas de la FAO. Recuperado el 18 de octubre de 2011, de Organización de las Naciones Unidas para Agricultura y la Alimentación: <http://www.fao.org/docrep/006/Y4893S/Y4893S00.HTM>.

- Mahajan, P. y Goswami, T. (2001). Enzyme kinetics based modelling of respiration rate for apple. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79(4), 399-406.
- Martín Belloso, O. y Oms Oliu, G. (2005). Efecto de la atmósfera modificada en las características fisico-químicas y nutricionales de la fruta fresca cortada. *Simposium: Nuevas tecnologías de conservación y envasado de frutas y hortalizas. Vegetales frescos cortados.*, (págs. 47-58). La Habana.
- Martín, O., Soliva, R. y Oms, G. (2006). Fresh-cut fruits. En Y. Hui (Ed.), *Handbook of Fruits and Fruit Processing* (págs. 129-144). U.S.A.: Blackbell Publishing.
- Martínez-Ferrer, M., Harper, C., Pérez-Muñoz, E. y Chaparro, M. (2002). Modified atmosphere packaging of minimally processed mango and pineapple fruits. *Journal of Food Science*, 67, 3365-3371.
- Mathlouthi, M. (1994). *Food packaging and preservation*. U. K.: Blackie Academic & Professional.
- Meyer, M. (2008). *Control de calidad de productos agropecuarios*. México: SEP Trillas.
- Nave, R. (2013). HyperPhysics. Department of Physics and Astronomy of Georgia State University. Recuperado el 15 de Junio de 2013, de Cellular Respiration: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- NMX-FF-061-SCFI-2003. Productos agrícolas no industrializados para consumo humano - Fruta fresca - Manzana (*Malus pumila* Mill) - (*Malus domestica* Borkh) – Especificaciones.
- Ospina, S. y Cartagena, J. (2008). La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos. *Revista Lasallista de Investigación*, 5(2), 112-123.
- Parry, R. (1993). *Principles and applications of modified atmosphere packaging of foods*. U. K.: Blackie Academic & Professional.

- Peras USA. (2011). Peras USA. Recuperado el 30 de Octubre de 2011, de Peras USA:  
<http://www.perasusa.com/>
- Pérez, L. (2003). Aplicación de métodos combinados para el control del desarrollo del pardeamiento enzimático en pera (variedad Blanquilla) mínimamente procesada. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Queiroz, C., Mendes Lopes, M. L., Fialho, E. y Valente-Mesquita, L. (2008). Polyphenol oxidase: characteristics and mechanism of browning control. *Food Reviews International*, 24, 361-375.
- Quevedo, R., Díaz, O., Caqueo, A., Ronceros, B. y Aguilera, J. (2009). Quantification of enzymatic browning kinetics in pear slices using non-homogeneous L\* color information from digital images. *Food Science and Technology*, 42, 1367-1373.
- Ravindra, M. y Goswami, T. (2008). Modelling respiration rate of green mature mango under aerobic conditions. *Biosystems Engineering*, 99, 239-248.
- Reyes, M. (2007). Efecto de la variedad y del procesamiento sobre la vida útil de frutillas mínimamente procesadas. (Tesis para obtener el grado académico de Magister en Ciencia y Tecnología de los Alimentos). Instituto de Tecnología de Alimentos, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.
- Rico, D., Martín-Diana, A., Barat, J. y Barry-Ryan, C. (2007). Extending and measuring the quality of fresh-cut fruit and vegetables: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 373-386.
- Rocculi, P., Del Nobile, M., Romani, S., Baiano, A. y Dalla Rosa, M. (2006). Use of a simple mathematical model to evaluate dipping and MAP effects on aerobic respiration of minimally processed apples. *Journal of Food Engineering*, 76, 334-340.
- Rocha, A. y Morais, A. (2001). Polyphenoloxidase activity and total phenolic content as related to browning of minimally processed 'Jonagored' apple. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82, 120-126.

- Rocha, A. y Morais, A. (2003). Shelf life of minimally processed apple (cv. Jonagored) determined by colour changes. *Food Control*, 14, 13-20.
- Rojas-Graü, M., Oms-Oliu, G., Soliva-Fortuny, R. y Martín-Belloso, O. (2009). The use of packaging techniques to maintain freshness in fresh-cut fruits and vegetables: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 875-889.
- Rojas-Graü, M., Sobrino-López, Á., Tapia, M. y Martín-Belloso, O. (2006). Browning inhibition in fresh-cut 'Fuji' apple slices by natural antibrowning agents. *Journal of Food Science*, 71, 59-65.
- SAGARPA. (2005). Plan Rector Sistema Nacional: manzana. Recuperado el 7 de septiembre de 2011, de Inforural: [http://www.inforural.com.mx/IMG/pdf/prn\\_manzana.pdf](http://www.inforural.com.mx/IMG/pdf/prn_manzana.pdf)
- Salinas-Hernández, R., Pirovani, M., Gardea-Béjar, A. y González-Aguilar, G. (2010). Cambios fisicoquímicos y sensoriales limitantes de la vida de anaquel de mango fresco cortado. *Rev. Fitotec. Mex.*, 33(3), 215-223.
- Sandhya. (2010). Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs. *LWT-Food Science and Technology*, 43, 381-392.
- Sinha, N. (2006). Apples. En Y. Hui (Ed.), *Handbook of Fruits and Fruit Processing* (págs. 265-278). U.S.A.: Blackwell Publishing.
- Soliva-Fortuny, R. C. y Martín-Belloso, O. (2003). New advances in extending the shelf-life of fresh-cut fruits: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 14, 341-353.
- Soliva-Fortuny, R., Grigelmo-Miguel, N., Odriozola-Serrano, I., Gorinstein, S. y Martín-Belloso, O. (2001). Browning evaluation of ready-to-eat apples as affected by modified atmosphere packaging. *J. Agric. Food Chem*, 49, 3685-3690.
- Supapvanich, S., Pimsaga, J. y Srisujan, P. (2011). Physicochemical changes in fresh-cut wax apple (*Syzigium samarangense* [Blume] Merrill & L.M. Perry) during storage. *Food Chemistry*, 127, 912-917.

- Torrieri, E., Cavella, S. y Masi, P. (2009). Modeling the respiration rate of fresh-cut Annauca apples to develop modified atmosphere packaging. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 890-899.
- Valle-Guadarrama, S., Gómez-Cruz, A., Cruz-Cruz, F. y Chan-Chi, A. (2009). Modelado de una atmósfera modificada para conservar frutos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*). *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(1), 33-38.
- Van Boekel, M. (2008). Kinetic modeling of food quality: a critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7, 144-158.
- Van Boekel, M. (2009). Kinetic modeling of reactions in food. U.S.A.: CRC Press.
- Wang, Z.-W., Duan, H.-W. y Hu, C.-Y. (2009). Modelling the respiration rate of guava (*Psidium guajava* L.) fruit using enzyme kinetics, chemical kinetics and artificial neural network. *European Food Research and Technology*, 229(3), 495-503.
- Washington Apples Comission. (2011). Washington Apples Comission. Recuperado el 30 de Octubre de 2011, de Washington Apples Comission: [http://www.bestapples.com/translations/varieties/varieties\\_gala.shtml](http://www.bestapples.com/translations/varieties/varieties_gala.shtml)
- Wiley, R. (1997). Frutas y hortalizas mínimamente procesadas y refrigeradas. Zaragoza: Acribia.
- Yoruk, R., y Marshall, M. (2003). Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: A review. *Journal of Food Biochemistry*, 27, 361-422.
- Zhang, Y., Liu, Q. y Rempel, C. (2011). Mathematical modeling of modified atmosphere packaging. En A. Brody, H. Zhuang, y J. Han (Ed.), *Modified Atmosphere Packaging of Fresh-cut Fruits and Vegetables* (págs. 11-29). Malaysia: Wiley-Blackwell.
- Zhuang, H.; Barth, M. y Fan, X. (2011). Respiration and browning discoloration of fresh-cut produce in modified atmosphere packaging. En A. Brody, H. Zhuang, y J. Han (Ed.), *Modified Atmosphere Packaging for Fresh-cut Fruits and Vegetables* (págs. 31-56). Malaysia: Wiley-Blackwell.