



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**CONSERVACIÓN DE FRUTOS DE ILAMA (*Annona diversifolia* Saff.) CON
PELÍCULA PLÁSTICA MICROPERFORADA**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN:

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

PRESENTA:

MARTÍNEZ RAMÍREZ GRACIELA



**DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES**



Mayo de 2012

Chapingo, Texcoco, Estado de México.

“Conservación de frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) con película plástica microperforada”

Tesis realizada por Graciela Martínez Ramírez bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN:

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

COMITÉ ASESOR

DIRECTOR:



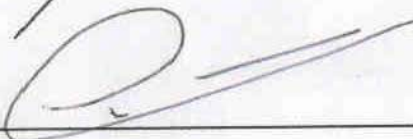
Dr. Salvador Valle Guadarrama

ASESOR:



Dr. Irán Alia Tejacal

ASESOR:



Dr. Juan Guillermo Cruz Castillo

ASESOR:



Dra. Ma. Teresa B. Colinas León

Chapingo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2012.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de Maestría en Ciencias contribuyendo con ello a mi formación profesional. A la Universidad Autónoma Chapingo, especialmente al Departamento de Ingeniería Agroindustrial y al programa de Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria por brindarme las herramientas necesarias en el proceso y para la culminación de esta etapa en mi formación académica, les estaré por siempre agradecida y corresponderé siendo portadora de su excelente calidad académica.

Al Dr. Salvador Valle Guadarrama por la dirección del presente trabajo, por su calidad humana, su orientación, apoyo, paciencia y disposición hasta el último momento. Agradezco también al Dr. Irán Alia, Dr. Juan G. Cruz y Dra. Ma. Teresa Colinas por sus acertadas observaciones a fin de mejorar el presente trabajo, así como a la Dra. Delia Moreno y Dr. Blas Cruz, por su siempre expresa disposición en colaborar, desde el inicio del planteamiento del presente proyecto.

Dr. Arturo Hernández Montés y Dra. Carmen Ibarra, coordinadores de la MCYTA, así como al personal administrativo del posgrado.

Agradezco a las personas que compartieron momentos agradables conmigo, una plática o un saludo sincero, especialmente a Ceyla, Magy, Tere, Roxana, Rosa Isela, Lupita, Diana, Dr. Teodoro, Ing. Oldaid y familia Zaragoza Hernández.

Sinceramente, Graciela.

DEDICATORIAS

A mí querida madre, mis siempre incondicionales hermanos y cuñados, especialmente para mis adorados sobrinos Selena, Adamaris y Giovanni por la inocencia de cada brazo y sonrisa, y como una promesa dedico la culminación de este trabajo y etapa en mi vida al ángel que la vida y Dios me dio la dicha de tener, y quien fuera mi fortaleza en la nada, mi hijo Luis Ángel[†].

Con todo mi corazón a mis abuelos Antonia y Ramón, por ser ejemplo de una vida honrada y de trabajo, los AMO.

“Todo tiene su tiempo, y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora”
(Eclesiastés 2:3)

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre: Graciela Martínez Ramírez

Fecha de nacimiento: 29 de Abril de 1983

Lugar de nacimiento: Bellavista de Santa María, Valle de Santiago, Guanajuato.

Domicilio actual: Pozo de Arostegui, Valle de Santiago, Guanajuato.

e-mail: maragraciela29@gmail.com

Preparación académica

2007-2009	Maestría en Ciencias (MCYT)
	Departamento de Ingeniería Agroindustrial, UACH.
2001-2005	Ingeniero Agroindustrial
	Departamento de Ingeniería Agroindustrial, UACH.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
DATOS BIOGRÁFICOS.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xii
SUMMARY	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Generalidades de la familia Anonáceae.....	5
2.2 Ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.).....	5
2.2.1 Zonas de producción y manejo del cultivo de ilama	8
2.2.2 Características del fruto de ilama	10
2.3 Cosecha, comercialización y comportamiento postcosecha de frutos de ilama.....	14
2.2.4 Problemática del cultivo de ilama	17
2.3 Significado y efectos fisiológicos de un almacenamiento refrigerado en atmósferas modificadas (AM).....	18
2.3.1 Uso de materiales plásticos en operaciones de envasado.....	24
2.3.2 El fenómeno de permeación en películas plásticas.....	26
2.3.3 Punto de compensación anaerobia (PCA)	28
2.3.4 Almacenamiento en atmósfera modificada con sistema microperforado	33
2.3.5 Efecto de las atmósferas modificadas creadas con películas plásticas sobre las variables físicas y fisiológicas del producto envasado	35
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	42

3.1 Origen, características y acondicionamiento del material vegetal	42
3.2 Organización experimental de la investigación	44
3.2.1 Evaluación del efecto de la intensidad de microperforado sobre las condiciones de operación de la atmósfera modificada	44
3.2.2 Caracterización física y metabólica de ilama.....	50
3.3 Metodologías de análisis de las variables respuesta	51
3.3.1 Variables físicas y químicas	51
3.3.2 Variables fisiológicas	57
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1 Evaluación del efecto de la intensidad de microperforado sobre las condiciones de operación de la atmósfera modificada	61
4.2 Caracterización física y metabólica de ilama.....	73
4.2.1 Caracterización inicial de los frutos de ilama.....	73
4.2.2 Pérdida de peso, tasa respiratoria y producción de etileno	78
V. CONCLUSIONES.....	95
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	97

ÍNDICE DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1. Constantes de regresión no lineal asociadas al modelo $y = y_0 + a[1 - \exp(-bt)]$, para la representación matemática de la variación en las concentraciones de O ₂ y CO ₂ de los sistemas de AM para frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) a 12°C y 20°C, en el interior de bolsas de polietileno de baja densidad con diferente intensidad de microperforado.....	72
Cuadro 2. Significancia estadística del análisis de varianza (ANOVA) para las concentraciones instaladas de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%), en sistemas de atmósfera modificada evaluados a 12°C y 20°C, con película plástica intacta, 5, 10 y 20 microperforaciones, y 12 horas de monitoreo.....	73
Cuadro 3. Efecto de la interacción doble entre los factores condición térmica de almacenamiento e intensidad de microperforado sobre la concentración instalada de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%) en sistemas de atmósfera modifica para el envasado de <i>Annona diversifolia</i> Saff.....	74
Cuadro 4. Efecto del factor condición térmica de almacenamiento sobre la concentración instalada de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%) en sistemas de atmósfera modifica para el envasado de <i>Annona diversifolia</i> Saff.....	75
Cuadro 5. Efecto del factor intensidad de microperforado sobre la concentración instalada de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%) en sistemas de atmósfera modifica para el envasado de <i>Annona diversifolia</i> Saff.....	75
Cuadro 6. Efecto del factor estación de muestreo sobre la concentración instalada de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%) en sistemas de atmósfera modifica para el envasado de <i>Annona diversifolia</i> Saff.....	75
Cuadro 7. Efecto del factor días de almacenamiento sobre el peso (g) de frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) almacenados durante 15 días a 20°C.....	94

Cuadro 8. Efecto del factor días de almacenamiento sobre la intensidad respiratoria ($\text{mL de CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) de frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) almacenados durante 15 días a 20°C.....	97
Cuadro 9. Efecto del factor días de almacenamiento sobre la producción de etileno ($\mu\text{L de C}_2\text{H}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) en frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) almacenados durante 15 días a 20°C.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Árbol de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) establecido como cerca viva...	6
Figura 2. Fruto, semilla y follaje de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.).....	7
Figura 3. Frutos de <i>A. diversifolia</i> Saff., cosechado antes de madurez comestible.	11
Figura 4. Frutos de <i>A. diversifolia</i> Saff., con diferente color de pulpa (a) blanca, (b) rosa y (c) rosa mexicano, recolectados en huertos del estado de Chiapas, México.....	11
Figura 5. Frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) en etapa de madurez fisiológica, en huertos del estado de Guerrero y Chiapas.....	12
Figura 6. Comercialización de frutos de <i>Annona diversifolia</i> Saff., en mercado local de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México., en estado de madurez comestible totalmente agrietados.....	14
Figura 7. Frutos de <i>A. diversifolia</i> Saff., (a) pulpa blanca, (b) pulpa rosa y (c) pulpa rosa mexicano en madurez comestible y con un avanzado agrietamiento al momento de la cosecha.....	15
Figura 8. Manejo y acondicionamiento de frutos de ilama al momento de la cosecha.....	16
Figura 9. Frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) con pedúnculo y follaje cosechados a 85 DDF, en las instalaciones del laboratorio de Investigación del Departamento de Ingeniería Agroindustrial, UACH.....	42
Figura 10. Unidades experimentales con distintos tratamientos de microperforado y serie de 12 tubos para muestreo de atmósfera instalada en condición térmica de 12°C.....	46
Figura 11. Unidades experimentales con distintos tratamientos de microperforado y serie de 12 tubos para muestreo de atmósfera instalada en condición térmica de 20°C.....	46
Figura 12. Reacción ácida colorimétrica con 10 puntos de dilución de solución estándar de glucosa (15 mg/100 mL) con reactivo antrona.....	61
Figura 13. Curva tipo para la evaluación de azúcares totales por el método colorimétrico de Antrona (Whitam <i>et al.</i> , 1971).....	62

Figura 14. Cinéticas de cambio en la concentración de O ₂ (●) y CO ₂ (○) en los sistemas de atmósfera modificada, para el envasado de frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) con condición térmica de almacenamiento a 20°C, en película plástica de polietileno de baja densidad; (A) película plástica intacta, (B) película plástica con 5 microperforaciones, (C) película plástica con 10 microperforaciones y (D) película plástica con 20 microperforaciones. Los símbolos puntuales representan la media de tres repeticiones y la línea sólida corresponde al ajuste de los datos utilizando un procedimiento de regresión no lineal.....	70
Figura 15. Cinéticas de cambio en la concentración de O ₂ (●) y CO ₂ (○) en los sistemas de atmósfera modificada, para el envasado de frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) con condición térmica de almacenamiento a 12°C, en película plástica de polietileno de baja densidad; (A) película plástica intacta, (B) película plástica con 5 microperforaciones, (C) película plástica con 10 microperforaciones y (D) película plástica con 20 microperforaciones. Los símbolos puntuales representan la media de tres repeticiones y la línea sólida corresponde al ajuste de los datos utilizando un procedimiento de regresión no lineal.....	71
Figura 16. Distribución del espacio de color en escala CIEL*a*b de los frutos de <i>Annona diversifolia</i> Saff.....	88
Figura 17. Cinética de la pérdida de peso fresco (g) en frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) almacenados en aire normal a 20°C. Los puntos graficados indican valores promedio de 5 repeticiones y las barras señalan la desviación estándar correspondiente.....	91
Figura 18. Cinética de la tasa respiratoria (expresada como producción de CO ₂) de frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) cosechados con 85 DDF y almacenados en atmósfera normal a 20°C. Los puntos graficados indican valores promedio de 5 repeticiones y las barras señalan la desviación estándar correspondiente.....	94
Figura 19. Cinética de producción de etileno en frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) cosechados con 85 DDF y almacenados en atmósfera normal a 20°C. Los puntos graficados indican valores promedio de 5 repeticiones y las barras señalan la desviación estándar correspondiente.....	99
Figura 20. Cinética de la tasa respiratoria y de producción de etileno en frutos de ilama (<i>Annona diversifolia</i> Saff.) cosechados con 85 DDF y almacenados en atmósfera normal a 20°C. Los puntos graficados indican valores promedio de 5 repeticiones y las barras señalan la desviación estándar correspondiente.....	100

CONSERVACIÓN DE FRUTOS DE ILAMA (*Annona diversifolia* Saff.) CON PELÍCULA PLÁSTICA MICROPERFORADA

CONSERVATION OF ILAMA FRUIT (*Annona diversifolia* Saff.) WITH MICROPERFORATED PLASTIC FILM

RESUMEN

En el presente trabajo se planteó estudiar la conservación de frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) con refrigeración y atmósfera modificada (AM), usando la propuesta de envase microperforado (μp), evaluando el efecto de la intensidad del μp sobre las condiciones de operación de la AM. Para ello, las condiciones de almacenamiento fueron 20°C y 12°C, y película plástica; sin μp , 5, 10 y 20 (μp). Las variables evaluadas fueron la concentración instalada de O₂ (%) y CO₂ (%) dentro de los envases, y sin película plástica se consideraron las cinéticas de pérdida de peso, tasa respiratoria y producción de etileno. Además, en condiciones ambientales normales, la caracterización física de los frutos se realizó con respecto al peso del fruto, color de la pulpa, forma y volumen. La ilama indicó frutos con masa promedio de 256.2 g, 60.7% de pulpa color rosa y luminosidad de 62.6%, forma ovoide y volumen de 291.9 cm³. Para todos los niveles de μp , la temperatura afectó ($p < 0.05$) las concentraciones instaladas de O₂ (%) y CO₂ (%). A 20°C las concentraciones de los gases se establecieron en 11.77% O₂ y 10.68% CO₂, mientras que a 12°C en 13.94% O₂ y 5.38% CO₂. Finalmente, a 20°C resultó mejor el sistema con 10 μp y para 12°C el de 5 μp . Por otro lado, las evaluaciones indican a la ilama como un fruto climatérico, con alta tasa respiratoria, presentándose la máxima tasa respiratoria con 253 mL de CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ un día previo al de máxima producción de etileno 1126 μL ·kg⁻¹·h⁻¹.

Palabras clave: Ilama (*Annona diversifolia* Saff.), atmósfera microperforada, O₂ (%), CO₂ (%), tasa respiratoria, etileno.

SUMMARY

In the present work was considered to study the conservation of ilama fruits (*Annona diversifolia* Saff.) with refrigeration and modified atmosphere (MA), using the proposal of microperforated (μp) package, evaluating the effect of the μp intensity on the operation conditions of the MA. For it, the storage conditions were 20°C and 12°C, and plastic film without μp , 5, 10 y 20 (μp). The evaluated variables were the concentration installed of O₂ (%) and CO₂ (%) inside the packages, and without plastic film the loss weight kinetic, respiratory rate and ethylene production were considered. In addition, in normal environmental conditions, the physical characterization of the fruits was realized with respect to the weight of the fruit, color of the pulp, shape and volume. The ilama indicated fruits with mass average of 256.2 g, 60.7% of pink pulp and luminosity of 62.6%, ovoid shape and volume of 291.9 cm³. For all the μp levels, the temperature affected ($p < 0.05$) the concentrations installed of O₂ (%) and CO₂ (%). At 20°C the gas concentrations were settled down in 11.77% O₂ and 10.68% CO₂, whereas a 12°C in 13.94 % O₂ and 5.38% CO₂. Finally, at 20°C was better the system with 10 μp and with 12°C the one of 5 μp . On the other hand, the evaluations indicate to ilama like a climacterical fruit, with high respiratory rate, appearing the maximum respiratory rate with 253 mL de CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ a previous day to the one of maximum ethylene production with 1126 μL ·kg⁻¹·h⁻¹.

Key words: Ilama (*Annona diversifolia* Saff.), microperforated atmosphere, O₂ (%), CO₂ (%), respiratory rate, ethylene.

I. INTRODUCCIÓN

El género *Annona* agrupa varias especies, una de ellas, la ilama (*Annona diversifolia* Saff.), también conocida como anona de pulpa rosada, pulpa blanca o papause. Esta especie produce frutos de exquisito sabor, teniendo un importante valor comercial, por su preferencia en mercados locales de las zonas de producción (Cruz-Pineda, 2002). Medicinalmente, se ha reportado que el compuesto palmitona, obtenido de las hojas de los árboles de ilama, presenta propiedades antiepilépticas con la ventaja de no producir efectos secundarios de sedación o hipnosis (González-Trujano *et al.*, 2006). Se trata de una especie subcaducifolia endémica de la cuenca del río Balsas, con mayor distribución en México y Centroamérica (Popenoe, 1920; Ruíz-Sánchez, 2007) y en una pequeña área del sur del estado de Florida en Estados Unidos (Popenoe, 1974). Para esta especie, se ha desarrollado muy poca investigación referente tanto a su manejo agronómico, como a su caracterización y aplicación de tecnologías de conservación de la calidad que los frutos alcanzan al momento de la cosecha. Dicha situación posiblemente se deba a que el cultivo es considerado de traspatio.

En México, en las zonas de producción (Campeche, Chiapas, Colima, Guerrero, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Sinaloa y Veracruz), los árboles de ilama

encuentran formando cercas vivas en las viviendas y ocasionalmente en pequeños huertos, por ello es considerada como planta de recolección (Chávez *et al.*, 1999). Y no obstante que la producción se obtiene de manera natural, sin ningún tipo de manejo agronómico, se tienen rendimientos de 10 kg·árbol⁻¹ (Otero-Sánchez *et al.*, 2006). En dichas zonas, el fruto es comercializado en madurez plena, cuando éste se agrieta, desprende del pedúnculo y cae del árbol; demeritando su calidad y periodo de vida útil, ya que en estas condiciones el fruto puede ser comercializado solo durante tres días a temperatura ambiente (Chávez *et al.*, 1999). Estos índices de cosecha y condiciones de manejo postcosecha del fruto, muy arraigados en los habitantes de las zonas de producción, representan un problema, ya que al caer el fruto del árbol sin el pedúnculo y agrietado, las grietas quedan expuestas al contacto con tierra. Además, el golpe de caída del fruto por sí mismo, implica un estado de estrés adicional, desencadenando otras situaciones que aceleran el deterioro del fruto, limitando de esta manera su vida de postcosecha.

Moreno-Velázquez *et al.* (2008) reportan que el momento óptimo de cosecha para ilama, que permite obtener las mejores características y vida postcosecha, corresponde a los 85 días después de iniciada la floración (DDF), aunque esta práctica no es aún difundida, ni aceptada entre los productores quienes en la mayoría de los casos no permiten la cosecha de los frutos sino hasta que estos manifiestan la apertura de la cáscara y desprendimiento del pedúnculo.

Es claro entonces, que la calidad postcosecha de los frutos en estado fresco, generalmente depende de la calidad alcanzada al momento de la cosecha, en

un apropiado estado de madurez y posterior manejo, acorde al producto del que se trate. En este sentido, para el manejo de frutas y hortalizas frescas se han desarrollado diversas tecnologías, que buscan conservar en la medida de lo posible dicha calidad. Entre ellas, la refrigeración que históricamente ha constituido una de las tecnologías más eficientes para alargar la vida de anaquel de los alimentos en general, y ésta en combinación con un almacenamiento en atmósferas controladas (AC) o modificadas (AM) mejora los beneficios, como lo muestran diversos trabajos, al retardar procesos de oscurecimiento, reducir la pérdida de peso, preservar la calidad organoléptica, modificar la tasa de respiración, conservar la calidad nutricional, modificar la síntesis y acción del etileno, controlar la producción de metabolitos anaerobios y condiciones microbiológicas de frutas y hortalizas (Martínez-Flores *et al.*, 2008; Valle-Guadarrama *et al.*, 2008; Monroy-Gutiérrez, 2009; Ventura-Aguilar *et al.*, 2011).

En el desarrollo de una AM se usan generalmente cubiertas de material plástico, que por sus propiedades inherentes de permeabilidad selectiva a gases, propician una reducción en la disponibilidad de O₂ y aumento de CO₂, en el ambiente circundante del producto envasado, lo que induce una modificación de la actividad metabólica del mismo (Kader, 2002). La gran ventaja de este método, es su relativo bajo costo en el control de atmósferas de almacenamiento. En este contexto, se cree que el uso de AM con película plástica puede constituir una alternativa viable de manejo postcosecha en frutos de ilama para alargar su vida de postcosecha. Sin embargo, algunos estudios

(Ruíz-Sánchez, 2007; Moreno-Velázquez *et al.*, 2008) refieren que el fruto de ilama posee una actividad respiratoria muy alta ($250 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), clasificándolo dentro de los frutos altamente perecederos, que con facilidad generan condiciones de anaerobiosis en situación de envasado. Con relación a ello, Montanez *et al.* (2005) señalan que el uso de películas perforadas representa una adecuación a la forma tradicional de implementación de una AM, en la que en vez de utilizar envases plásticos intactos a éstos se les genera una o más perforaciones que permiten controlar en forma más directa el intercambio de gases entre el interior y el exterior de dicho envase, y por tanto se tiene un mejor control sobre las concentraciones de O_2 y CO_2 que se instalan en el interior del envase. Lo anterior tiene sentido, si se plantea que todos los productos almacenados en AM, exhiben tolerancias a la baja disponibilidad de O_2 y elevada presencia de CO_2 , lo que determina los límites de operación de esta tecnología para cada producto en particular. Por lo que, se requiere evitar que el O_2 - CO_2 se instale en concentraciones fuera de las toleradas por el producto envasado (Cameron *et al.*, 1995).

1.1 Objetivo

Evaluar el efecto de la intensidad de microperforado (5, 10 y 20 microperforaciones) sobre las condiciones de operación (O_2 % - CO_2 %) instaladas en la atmósfera modificada generada por una película plástica para envasar frutos de ilama.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades de la familia Anonáceae

La familia anonácea está conformada por 80 géneros y cerca de 850 especies, de los cuales, cuatro géneros son los más importantes: *Annona*, *Rollinia*, *Uvaria* y *Asiminia*. Las especies del género *Annona*, de mayor interés económico, son la *Annona diversifolia*, *Annona muricata*, *Annona reticulata*, *Annona purpúrea*, *Annona cherimola*, *Annona squamosa*, *Annona glabra* y *Annona holosericea* (Cruz-Pineda y Deras-Flores, 2000). En Guatemala, por ejemplo, están reportadas 11 especies del género *Annona*, algunas en estado cultivado y otras en estado silvestre (Standley y Steyermark, 1946; Azurdia y González, 1986). En Mesoamérica, para especies como *Annona cherimola*, *A. muricata* y *A. squamosa*, se ha desarrollado tecnología para la producción y manejo del cultivo. Otras especies, *A. diversifolia* y *A. reticulata* en cambio, han sido marginadas a pesar de su valor intrínseco y potencial como frutales.

2.2 Ilama (*Annona diversifolia* Saff.)

Annona diversifolia Saff. es un árbol (figura 1) nativo de las tierras bajas y cálidas del sureste de México y Centroamérica. Los frutos de este árbol reciben varios nombres dependiendo de la zona de producción: ilama, zapote ilama,

papause, anona de pulpa blanca o pulpa rosa, etc., con alto potencial para su cultivo, debido al excelente sabor y aroma del fruto que lo hace aceptable para su aprovechamiento como fruta fresca o para su procesamiento (FAO, 1992). Medicinalmente, se ha reportado que el compuesto Palmitona, obtenido de las hojas, presenta propiedades antiepilépticas con la ventaja de no producir efectos secundarios de sedación o hipnosis (González-Trujano *et al.*, 2006). Las hojas son muy populares como anti-inflamatorias, además presentan propiedades analgésicas y antibacterianas (Popenoe, 1920; Luna-Cazáres y González-Esquinca, 2008).



Figura 1. Árbol de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) establecido como cerca viva.

Al igual que otras anonáceas, la ilama es una especie subcaducifolia (George y Nissen, 1987), la brotación floral y vegetativa ocurre de manera conjunta durante los meses más secos y cálidos del año (abril a mayo); el crecimiento de brotes, ramas y hojas, así como la formación del fruto, tienen lugar durante la estación de lluvias (junio a septiembre), mientras que el reposo es la última etapa del ciclo fenológico anual, la cual se inicia de diciembre a enero y termina con la nueva brotación en abril. La floración y amarre de frutos son las etapas críticas en ilama y en otras anonáceas ya que ocurren en condiciones ambientales adversas (George y Nissen, 1987; George *et al.*, 1990).

La presencia de hojas con una densa cubierta de cera epicuticular, sin tricomas y estomas parcialmente hundidos, así como el hábito subcaducifolio, constituyen las principales características morfológicas y fisiológicas que podrían estar involucradas en la adaptación y productividad de esta especie (figura 2) (Otero-Sánchez *et al.*, 2006).



Figura 2. Fruto, semilla y follaje de ilama (*Annona diversifolia* Saff).

La baja productividad de los árboles, la dificultad de germinación de las semillas, y la poca duración de la fruta en los mercados, 2-3 días a temperatura ambiente después de la cosecha, son los principales factores que han contribuido a la marginación de este frutal.

2.2.1 Zonas de producción y manejo del cultivo de ilama

Annona diversifolia Saff., es un frutal que crece en la vertiente del Pacífico desde el centro de México hasta El Salvador, entre 0 y 1800 msnm, pero se siembra más intensamente entre los 200 a 600 msnm, considerado como un cultivo rústico, los árboles de ilama soporta condiciones adversas, propias de suelos arcillosos y pedregosos, requieren de un clima caluroso, con temperaturas entre 24 a 37°C y con alternancia de estación seca y húmeda (Morton, 1987; León, 1989). Se adapta bien desde los 100 a 800 msnm en suelos franco arenosos y arcillosos, los cuales permiten un buen desarrollo vegetativo y productivo del cultivo (Cruz-Pineda, 2002). Se cultiva sólo en poblaciones de pocos árboles, junto con otros frutales, encontrándose en forma silvestre o constituyendo cercas vivas en los patios de las viviendas en las zonas de producción, y ocasionalmente en pequeños huertos, por tanto, es considerada como planta de recolección.

En México su producción se localiza en los estados de Colima, Estado de México, Campeche, Chiapas, Guerrero, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Sinaloa y Veracruz (Chávez *et al.*, 1999; Ruíz-Sánchez, 2007). Actualmente, la producción que se obtiene de manera natural, sin ningún tipo de manejo agronómico, se limita a huertos familiares con plantas provenientes de

propagación por semilla, con la consecuente heterogeneidad genética. Otero-Sánchez *et al.* (2006) mencionan que en condiciones del trópico seco de Guerrero, sin ningún tipo de manejo agronómico, los árboles producen de manera aceptable hasta 10 kg de fruta por árbol. Al respecto el mismo autor propuso para este frutal, validar la tecnología de producción utilizada en frutales caducifolios, aplicada al manejo de cultivo de ilama en condiciones agro ecológicas del trópico seco de Guerrero, estudiando; el crecimiento, rendimiento y calidad del fruto en respuesta al manejo de la defoliación, poda y riego, encontrando que bajo estas condiciones de manejo, se incrementó el número de brotes nuevos por árbol en respuesta a la defoliación inducida. El riego también aumentó el número de flores por rama, número de frutos por árbol y el porcentaje de amarre final, mientras que la poda acrecentó la firmeza del fruto, pero disminuyó el contenido de nitrógeno reducido y el número de frutos por árbol. Estos resultados indican la factibilidad de manejar el cultivo en condiciones del trópico seco, mediante un sistema de producción intensiva, incluyendo las prácticas de riego y defoliación.

En la propagación por semilla, la recolección de estas debe hacerse cosechando frutos de ilama de árboles con excelente producción y sanidad; de ellos se escogen los frutos de mejor calidad en cuanto a tamaño, sabor y estado sanitario. Luego se procede a quitarle la pulpa adherida a las semillas, estas se lavan con suficiente agua y se dejan por 3 días a la sombra para el secado. Cuando las semillas están secas, se pueden almacenar a temperatura ambiente durante un periodo de 7 a 12 meses, necesario para obtener mejor índice de germinación a la siembra. Si las semillas se siembran recién cosechados los

frutos, estas no germinaran, por el estado de latencia que presentan. Por ello, se recomienda recolectar semilla durante el periodo que dura la cosecha y sembrarla en el siguiente año (Cruz-Pineda, 2002).

Cruz-Pineda y Deras-Flores (2000) reportan que la mayor incidencia por plaga en frutos y semillas de ilama es causada por el perforador *Bephrateloide* ssp., siendo la antracnosis (*Colletotrichum* sp.) la enfermedad más común en frutos y follaje, causando perforación de frutos y semillas, momificación de frutos y necrosis en el follaje, disminuyendo significativamente la calidad del fruto en la cosecha.

2.2.2 Características del fruto de ilama

Se considera que *Annona diversifolia* Saff., es la especie del genero *Annona* que produce el fruto más fino y exquisito por su sabor, teniendo mayor valor comercial que otras especies del mismo género. Cruz-Pineda (2002) reporta como las principales características morfológicas del fruto de ilama; un peso promedio de 739 g, color de pulpa rosada o blanca, forma ovoide elipsoidal con carpelos prominentes (figura 3), con textura de pulpa blanda y sabor dulce, textura de la cascara áspera, y un promedio de 70 semillas. Cruz-Pineda y Deras-Flores (2000) encontraron que el contenido nutricional de frutos de ilama corresponde a 79.6% humedad, 1.31% proteína, 0.01% grasa, 1.26% cenizas, 0.97% fibra cruda y 300 ppm fósforo.

En general, dependiendo de la especie, los frutos de ilama pueden presentar pulpa blanca o rosada hasta tonos rosa mexicano con semillas oblongas de color café lustroso (figura 4). Las semillas están inactivas por varias semanas o

meses después de que el fruto madura, con un porcentaje de germinación altamente variable en un intervalo de 30 a 80% (Campbell y Popenoe, 1968). Botánicamente los frutos son agregados, indehiscentes y pubescentes (figura 5) (Pennington y Sarunkhan, 1968).



Figura 3. Frutos de *A. diversifolia* Saff., cosechado antes de madurez comestible.

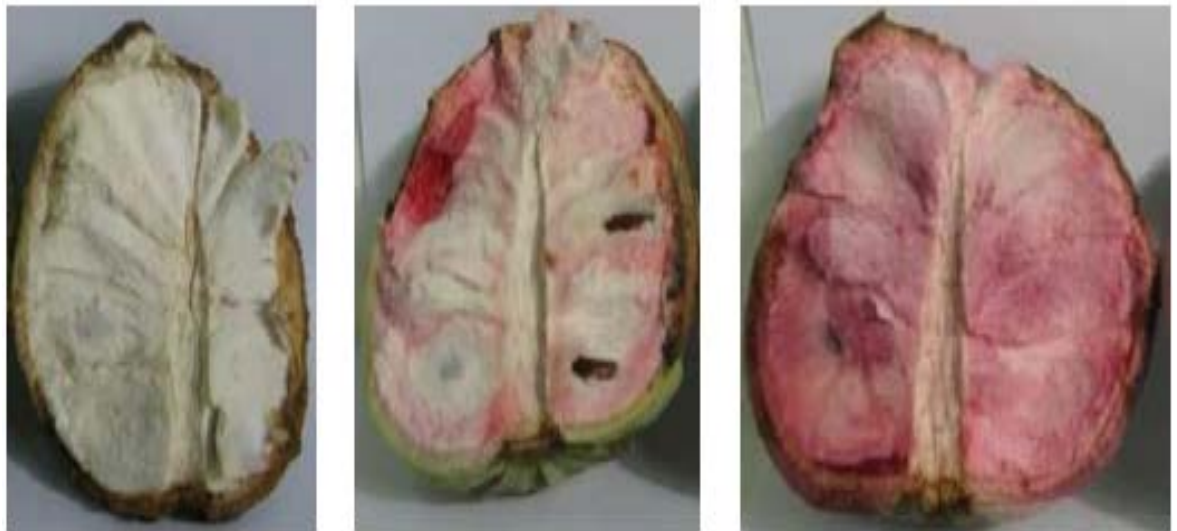


Figura 4. Frutos de *A. diversifolia* Saff., con diferente color de pulpa (a) blanca, (b) rosa y (c) rosa mexicano, recolectados en huertos del estado de Chiapas, México.



Figura 5. Frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) en etapa de madurez fisiológica, en huertos del estado de Guerrero y Chiapas.

De *A. diversifolia* Saff, los cultivares; Fairchild, Rosendo Pérez, Guillermo y Gramajo tienen frutos de cáscara gruesa, verde grisácea, con aréolas prominentes redondas y pulpa rosada, 'Rosendo Pérez' y 'Gramajo' son de frutos grandes, el cultivar 'Imery' (seleccionado en El Salvador), de frutos grandes con cáscara menos gruesa y prominencias bajas, verde-rosada

(grisáceo-café en la madurez), tiene la pulpa rosada. Por otro lado, 'Pajapita' con superficie suave, rosada (café cuando está madura), tiene pulpa rosada brillante, mientras que Nilito tiene la superficie ligeramente irregular, verde azulada, y pulpa roja, Román es de frutos más pequeños, con cáscara dura, verde azulada con manchas rosadas, y pulpa purpura y el cultivar Genova White tiene la cáscara verde blancuzca, suave y delgada, y pulpa blanca (Mahdeem, 2010).

La curva de crecimiento de los frutos de ilama se comporta con un patrón doble sigmoide, con una tasa respiratoria típica de frutos climatéricos (Zavala, 1995; Ruíz-Sánchez, 2007; Moreno-Velázquez *et al.*, 2008). En México los frutos de esta especie presentan una gran variabilidad fenotípica, presentándose en el estado de Chiapas la mayor diversidad, en cuanto a formas (cónica, acorazonada, oval y redonda) y color de pulpa (púrpura, rosada, crema y blanca), mientras que la menor diversidad se reporta en la población El Salitre de Palmerillos en el Estado de México, con frutos de forma aovada y color blanco (Ruíz-Sánchez, 2007). Los fenotipos de pulpa rosa, con distribución en el estado de Guerrero, reportan el mayor contenido de sólidos solubles con 19.1°Brix y firmeza de 2.7 kg_f, en comparación con los frutos de pulpa blanca con 15.7°Brix y 2.1 kg_f, los encontrados en el estado de Chiapas presentan 18.6°Brix y firmeza 2.2 a 8.1 kg_f, mientras que en frutos de pulpa blanca la relación es 7.57°Brix y firmeza 2.2 a 8.1 kg_f (Vidal, 1993).

2.3 Cosecha, comercialización y comportamiento postcosecha de frutos de ilama

En México la ilama es un frutal con alto potencial para comercializarse en fresco, principalmente en las zonas de producción. Ya sean frutos con pulpa rosada o blanca, estos son muy finos y exquisitos por su sabor, con alto grado de preferencia en el mercado local, de los lugares de producción. Díaz (1981) menciona que se ha encontrado de manera esporádica comercialización de frutos de ilama en mercados parisinos, especializados en frutos exóticos, pero más como un raro espécimen tropical, que como fruta de consumo. No obstante, los frutos son altamente perecederos y se pueden comercializar (figura 6) en un corto período de tiempo en madurez plena. Con relación a ello, Chávez *et al.* (1999) reportan un periodo máximo de comercialización para los frutos de ilama en madurez plena de solo 3 días.



Figura 6. Comercialización de frutos de *Annona diversifolia* Saff., en mercado local de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México., en estado de madurez comestible totalmente agrietados.

Chávez *et al.* (1999) señalan que se reconoce el momento de cosecha de los frutos de ilama, cuando ha ocurrido el agrietamiento del fruto (figura 7) y desprendimiento del pedúnculo, llegando incluso a caer las ilamas del árbol. Lo anterior, de acuerdo con los productores, coincide con el estado de madurez plena y de consumo, tomándolo como índice de cosecha. Sin embargo, ello favorece el ataque de microorganismos causantes de pudriciones y acelera el deterioro del fruto. Estas condiciones limitan su vida de anaquel a un periodo máximo de tres días a temperatura ambiente (Otero-Sánchez *et al.*, 2006).



Figura 7. Frutos de *A. diversifolia* Saff., (a) pulpa blanca, (b) pulpa rosa y (c) pulpa rosa mexicano en madurez comestible y con un avanzado agrietamiento al momento de la cosecha.

Gutiérrez (2009) reporta que la época de cosecha (figura 8) para los frutos de ilama comienza a finales de julio y se extiende hasta el mes de septiembre. Por otro lado, Vidal (1993) menciona un periodo de cosecha que comprende desde el mes de septiembre hasta octubre. Hasta la fecha, son escasos los trabajos relacionados a impulsar la aplicación de las tecnologías disponibles en el

mercado para la conservación de frutos frescos, orientadas a prolongar la vida y calidad postcosecha de frutos de ilama. En este sentido, Ruiz-Sánchez (2007) planteo la propuesta de evaluar un sistema de almacenamiento en atmósfera modificada para este fruto, encontrando que bajo dichas condiciones de almacenamiento, se logra reducir la pérdida fisiológica de peso y mantener los valores de firmezas en los frutos.



Figura 8. Manejo y acondicionamiento de frutos de ilama al momento de la cosecha.

De manera adicional, en la actualidad, la información sobre estudios en fisiología de crecimiento de frutos de ilama es escasa, lo que dificulta definir mejores estados de desarrollo para llevar a cabo la cosecha, que permitan un mayor tiempo de vida útil con calidad aceptable en postcosecha y hasta su consumo. Moreno-Velázquez *et al.* (2008) señalan que con un periodo de 99 días después de floración (DDF), aunque hay más acumulación de azúcares, los frutos de ilama se encuentran ya agrietados. Por lo cual, considera con base

en el estudio realizado sobre cambios bioquímicos, biofísicos y fisiológicos durante el crecimiento y maduración de frutos de ilama, que con una cosecha a los 85 DDF los frutos ya tienen características organolépticas aceptables, sin la presencia de agrietamiento, lo que implica mejor apariencia y posibilidad de incremento de vida postcosecha.

Sobre los volúmenes de producción de esta fruta, ningún país productor reporta datos oficiales que indiquen información al respecto de la producción total, importación, exportación y precios de la ilama. En cuanto a los rendimientos, Cruz-Pineda (2002) señala que un árbol en producción puede tener rendimientos entre 30 y 60 frutos por año. En México, para el estado de Chiapas se reportan rendimientos que oscilan entre 15 y 30 unidades/árbol/estación y un promedio de 26 unidades/árbol/estación en el Estado de México y un precio promedio para el año 2002 que fluctuó entre \$5 y \$15 (Martínez, 1992; Estrada y Marroquín-Andrade, 1995).

2.2.4 Problemática del cultivo de ilama

A pesar de la riqueza fitogenética que posee México, en general las anonas no forman parte de la agenda agrícola. Es decir, no son objeto de programas de fomento ni de mejoramiento genético por parte del sector público y privado. Sin embargo, en el SINEREFI (SAGARPA) está considerada ser prudente.

Muchas de las especies de este género se encuentran en estado silvestre y las especies cultivadas solo se localizan a nivel de huertos familiares. Lo anterior, aunado a que las anonas se consideran hospederos alternos de la mosca de la fruta y la necesidad de habilitar tierras para uso agrícola, coloca a estos frutos

en una situación de peligro de erosión genética o inclusive desaparecer al ser eliminadas del agroecosistema. Por ejemplo, para *Annona diversifolia* Saff. es urgente trabajar en los siguientes aspectos; propagación vegetativa de las mejores variedades, utilizando diversos patrones y métodos de injerto, métodos de interrupción eficaz de la latencia en las semillas, recolección y manejo comercial de la fruta, aumento del período de producción, seleccionando variedades tempranas y tardías, hibridación con otras especies de anonas para la producción de frutos de mayor adaptación y mejores características, desarrollo y/o implementación de las tecnologías de conservación de la calidad en fresco de frutas y hortalizas, así como opciones de procesamiento para el fruto.

2.3 Significado y efectos fisiológicos de un almacenamiento refrigerado en atmósferas modificadas (AM)

Desde el momento en que los productos hortofrutícolas son recolectados o cosechados, estos inician su deterioro natural como parte normal de su ciclo de vida, que los llevará finalmente hasta la pérdida del producto para consumo humano o procesamiento.

Este deterioro, se debe a que todos los frutos después de la cosecha mantienen procesos metabólicos (respiración, transpiración, senescencia, etc.), cuyo resultado, de la mayoría de dichos procesos, será la degradación de la calidad del producto. En este sentido, la aplicación adecuada de alguna tecnología de manejo postcosecha de productos hortofrutícolas es esencial para mantener la calidad y prolongar su vida de anaquel, optimizando su manejo comercial y

valor económico. Por ejemplo, el almacenamiento de frutas y hortalizas en sistemas de atmósfera modificada (AM) permite obtener un mayor período de vida útil del producto fresco.

Con base en la revisión de diversas experiencias Kader (1997) señala que la exposición de un fruto a un ambiente con concentraciones de O_2 y CO_2 menor y mayor a 5 kPa, respectivamente, causa una disminución de la tasa respiratoria, reducción de la tasa de producción y acción de etileno, reducción en la degradación de clorofila y síntesis de antocianinas y carotenoides, reducción de la actividad de enzimas relacionadas con los procesos de ablandamiento y oscurecimiento, retardo en pérdida de acidez. Asimismo, se ha documentado que el uso de ambientes con concentraciones altas de CO_2 (entre 10 y 20%) es efectivo para la supresión de la mayoría de hongos (Adaskaveg *et al.*, 2002). También se reportan; retraso de la pérdida de firmeza, disminución de las alteraciones fisiológicas y daños por frío, conservación del color y vitaminas, regulación de la actividad biológica del producto y reducción tanto del crecimiento microbiano como de la pérdida de agua del producto, modificación de la velocidad de producción de etileno que promueve la maduración y senescencia de los frutos, como efecto de la reducción de los niveles de oxígeno y enriquecimiento de la concentración de dióxido de carbono (Parry, 1995).

No obstante todos los resultados favorables que un almacenamiento en atmósfera modificada (AM) o atmósfera controlada (AC) evidencian, el uso de estas tecnologías debe considerarse como un complemento al manejo de

temperatura en un almacenamiento refrigerado. Después de la cosecha, si la temperatura circundante al fruto no es regulada; la transpiración, respiración y demás procesos metabólicos en las frutas y hortalizas son intensos. Y en general, conducen a cambios muy rápidos en la calidad del producto. Entonces, sería necesario enfriar el producto hortofrutícola tan rápidamente como sea posible, después de la cosecha, para disminuir la velocidad de los procesos metabólicos. Se ha recomendado un lapso de 24 horas para reducir la temperatura del ambiente circundante a la de almacenamiento (Cantewell, 1995). En general, existen cuatro métodos principales para llevar a cabo el enfriamiento de frutas y hortalizas, entre los que podemos encontrar; enfriamiento en cámara fría, enfriamiento en cámara de refrigeración con aire forzado, hidrogenfriado, aplicación hielo troceado y enfriamiento mediante vacío. El enfriamiento por aire frío forzado es un método adaptable a una mayor diversidad de productos que ningún otro método, es mucho más rápido que el enfriamiento en cuarto frío, debido a que el aire frío circula a través, en lugar de alrededor de los contenedores, lo que permite al aire frío tener contacto directo con el producto caliente (Kader, 2007).

En un sistema de AM la temperatura es un factor muy importante, no sólo como un parámetro directo que puede modificar por si solo la calidad del producto, también lo es como un parámetro que influye en otros. Ciertamente, la permeabilidad a distintos gases en la película de envasado que genera un sistema de AM o AC, varía con la temperatura (Salvador *et al.*, 2002). Es decir, el uso de un almacenamiento en AM o AC no sustituye las ventajas de un

almacenamiento refrigerado. Se sabe, que tanto en productos climatéricos como no climatéricos, al descender la temperatura se disminuye el ritmo de deterioro, es por ello que la refrigeración es la tecnología con mayor aplicación en la conservación de productos hortofrutícolas y alimentos en general. Ésta tiene pocos efectos adversos en el sabor, textura, valor nutritivo y otros atributos; siempre y cuando los tiempos y condiciones de almacenamiento no excedan las especificaciones de cada producto (Potter y Hotchkiss, 1995). Lo anterior, tiene su fundamento en el hecho de que las velocidades de reacción de los procesos metabólicos involucrados en todo el ciclo de vida de los frutos, se incrementan o reducen por cada diez grados de aumento o reducción en la temperatura, relación que se expresa como Q_{10} (Wills *et al.*, 1984). Aguayo *et al.* (2004) afirman que la temperatura y momento de corte en los melones frescos cortados, afecta significativamente la calidad y tasa de respiración del producto. La mejor calidad de éstos se obtiene a 0°C debido a que se mejora apariencia y se mantiene el aroma típico de los frutos. Por otra parte, Mohapatra *et al.* (2007) mencionan que la temperatura tiene un efecto importante en la actividad de las enzimas peroxidasa y polifenoloxidasas; de manera que, un incremento en la temperatura origina una rápida actividad enzimática. Sin alterar los niveles de O_2 , las fluctuaciones inadecuadas de temperatura dan probablemente como resultado el daño irreversible a la membrana celular y reducción de la actividad mitocondrial en frutos.

El fundamento de un almacenamiento en AM o AC es extender la vida de anaquel de los productos frescos dentro de un empaque permeable,

manteniendo una microatmósfera óptima, usualmente; reduciendo el nivel de O_2 y elevando los niveles de CO_2 . Una microatmósfera deseable puede ser establecida rápidamente por nivelación del espacio de cabeza del empaque con una mezcla de gases y manteniendo la atmósfera, controlando la afluencia del O_2 y CO_2 . También la microatmósfera puede establecerse a una velocidad lenta, permitiendo que por efecto del proceso natural de respiración del fruto, dentro del empaque, se alcance una atmósfera en equilibrio (Lee *et al.*, 1991). Cuando los procesos de respiración y difusión de gases a través de la película han alcanzado un equilibrio, las concentraciones de O_2 y CO_2 dentro del empaque dependen básicamente de la velocidad de respiración de los productos envasados (Yahia e Higuera, 1992). Estas dos modalidades de envasado, se conocen respectivamente como atmósferas modificadas activas y pasivas (Smith *et al.*, 1990). Pereira *et al.* (2004) encontraron que las atmósferas modificadas pasivas, con niveles intermedios de O_2 y altos niveles de CO_2 , tienen una fuerte influencia sobre la preservación de color en guayaba y evitan la pérdida de peso de los productos durante su almacenamiento.

En la práctica una AM se genera con empaques cuyas paredes o fronteras se forman de películas poliméricas o recubrimientos de diverso materiales (Sri-laong *et al.*, 2002). Cuando se trata de un envasado con material polimérico, en el interior se coloca el material biológico a conservar, que interacciona con la mezcla de gases que le rodea, al absorber O_2 y liberar CO_2 fundamentalmente. En este aspecto, la evidencia ha mostrado que todas las películas poliméricas son permeables a los gases en diferente grado (permeación selectiva), de

manera que en un sistema de atmósfera modificada, ocurre un intercambio gaseoso entre el ambiente circundante al fruto y el externo al empaque. Estos dos tipos de interacción dan como resultado la modificación de la mezcla gaseosa que rodea al fruto, lo que origina el nombre de esta tecnología de almacenamiento (Brody, 1989; Romojaro *et al.*, 1996). Al cabo de cierto tiempo las velocidades de consumo o producción de los componentes gaseosos por parte del fruto se igualan con las velocidades de intercambio a través del polímero, y entonces, la composición gaseosa dentro del empaque alcanza un valor constante, llamado concentración de régimen estacionario (Gong y Corey, 1994; Talasalia *et al.*, 1994; Cameron *et al.*, 1995).

Kader (2002) describe a una AM o AC como aquellas en las que se eliminan o añaden gases, para crear una composición atmosférica alrededor del producto que difiere de aquella del aire natural (78.09% de N₂, 20.95% de O₂ y 0.03% de CO₂). Una definición general de un alimento almacenado en atmósfera modificada sería un alimento perecedero almacenado en un ambiente diferente al aire (Farber *et al.*, 1993). La AC y AM difieren solo en el grado de control de la concentración atmosférica de los gases. Una AC es monitoreada y controlada con mayor precisión que la AM, ya sea instrumental o químicamente sobre una base en curso, mientras que la atmósfera modificada depende, entre otras cosas; de la respiración del producto, estado de madurez, temperatura, atmósfera, daños, cultivar y duración del almacenamiento (Berrios, 2002).

2.3.1 Uso de materiales plásticos en operaciones de envasado

Los recubrimientos con biopolímeros para crear condiciones de atmósfera modificada, abren un camino efectivo y económico, constituyendo una de las líneas de desarrollo del envasado de alimentos, y significa una alternativa de gran interés práctico para conservar frutas y hortalizas, durante un mayor periodo de comercialización, con las debidas garantías de calidad y seguridad. Con la elección del material y forma del envase, con las adecuadas propiedades de barrera a gases y vapores, así como su respuesta a los diferentes factores externos (temperatura, humedad, luz y las manipulaciones propias de la comercialización) se puede conseguir alargar la vida útil y periodo de comercialización de los alimentos envasados. En general, los empaque plásticos deben reunir una serie de características deseables para ser utilizados en la conservación de frutos frescos, tales como; adecuada permeabilidad para los diferentes gases, ser transparentes, livianos, resistentes, no tóxicos ni reactivos con el fruto y fáciles de etiquetar para fines comerciales, entre otras cosas.

Los materiales plásticos para el envasado de alimentos, adquiere importancia creciente, desplazando de forma progresiva para muchos usos a otros materiales clásicos, hasta ocupar en la actualidad un papel relevante. Por ejemplo, se sabe que para las frutas y vegetales frescos constituye, sin duda, la mejor opción al posibilitar su perfecto aislamiento del medio y la aplicación simultánea de tecnologías de conservación, por ejemplo las atmósferas modificadas y refrigeración. Dentro de las propiedades de mayor importancia en

los materiales plásticos, para la industria alimenticia se encuentran; las propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la ruptura y resistencia al impacto. El segundo tipo de propiedades a ser analizadas, son las propiedades de barrera; centrándonos en la permeabilidad al vapor de agua, como varía con la temperatura y como afecta la vida útil del producto empacado (Quintana, 2007).

La importancia de regular el intercambio de vapor de agua, que los frutos liberan de manera natural como parte de sus procesos metabólicos, se centra en el hecho de que una condición controlada de este factor puede ayudar a reducir el proceso de transpiración del fruto, además dar una apariencia externa al fruto hidratada. Lo anterior, no resulta ser favorable cuando se trata de materiales poliméricos con baja permeabilidad al vapor de agua. Ya que una situación de baja permeabilidad a vapor de agua provoca dentro del envase ambientes con humedad relativa próxima al 100%, originando condensaciones que se depositan sobre la superficie del producto, produciendo pérdidas de calidad debido a decoloraciones, y aumento de podredumbres, por el crecimiento de microorganismos, favorecido por las condiciones ambientales (Schlimme y Rooney, 1997).

En el mercado muchos son los tipos de materiales de envases plásticos que se utilizan para frutas y hortalizas. Entre las películas plásticas comúnmente empleadas para el envasado en atmósferas modificadas se incluyen; el cloruro de polivinilo, polipropileno, poliestireno y polietilenos. Actualmente, las líneas de desarrollo para la implementación de tecnologías de atmósferas modifica

usando materiales poliméricos, se centran en el diseño de materiales para el manejo de paquetes a granel, productos con alta tasa de respiración y/o frescos cortados (Fonseca *et al.*, 2002).

De acuerdo con Rooney (1995) un envase puede calificarse como activo cuando desarrolla alguna otra función que la de proporcionar una barrera inerte a las condiciones externas. Para Hotchkiss (2000) un envase activo es aquel que interacciona directamente con el producto y con su entorno para mejorar uno o más aspectos de su calidad o seguridad. Por otro lado, se denomina envase pasivo a aquel, que actúa como una barrera pasiva, para simplemente separar el producto del ambiente. En el contexto de estas definiciones, tanto los plásticos sintéticos, como los recubrimientos comestibles, debido a las propiedades inherentes de permeabilidad selectiva a gases, pueden ser ubicados en la categoría de envases activos.

2.3.2 El fenómeno de permeación en películas plásticas

Los plásticos no son una barrera completa a la transferencia de masa, como lo son el vidrio y los metales, y siempre existe posibilidad de que ocurra, en alguna medida, la transferencia de gases y moléculas de bajo peso molecular en el sistema ambiente-polímero-alimento. Por ello, el uso de materiales plásticos como envase para alimento, está determinado por su capacidad para impedir que exista una transferencia indeseable de componentes del envase al producto y en sentido contrario, y también de la capacidad del envase para limitar la entrada de componentes atmosféricos y ambientales que pudieran

causar modificaciones indeseables en el producto y/o afectar su periodo de conservación. De acuerdo con González-Aguilar *et al.* (2005) los distintos mecanismos de transferencia de masa en estos sistemas de envasado, corresponden a fenómenos de permeabilidad (transferencia de gases, vapores y aromas a través del envase), sorción (retención de componentes del alimento envasado en el polímero) y migración (transferencia de componentes del plástico al alimento envasado).

La forma de expresar las características de barrera de las películas de materiales poliméricos es con su coeficiente de permeabilidad o cantidad de fluido que difunde a través del material bajo condiciones específicas de presión y temperatura, por unidad de espesor y superficie. En la práctica, la permeabilidad es un parámetro básico para la evaluación objetiva de la propiedades de barrera y, por tanto, para la definición de la aptitud de los materiales plásticos para ser usados en operaciones de envasado. Para muchos materiales se dispone de datos sobre su permeabilidad, en la literatura técnica, que deben consultarse al plantear su utilización práctica. Con un buen conocimiento del efecto de la atmósfera de envasado sobre las características que definen la calidad de un alimento y las medidas de permeabilidad del envase, se permite estimar incluso la vida útil que cabe esperar (González-Aguilar *et al.*, 2005).

Entre otras cosas, la permeabilidad a los gases de un material de empaquetado concreto, depende de; la naturaleza del gas, la estructura y espesor del material, la temperatura y humedad relativa de las condiciones de manejo.

Algunos autores definen la permeabilidad como la capacidad de una película para transportar un gas de uno de sus lados al otro, expresada por el producto del coeficiente de solubilidad y el coeficiente de difusividad del gas penetrante en el polímero (Kester y Fennema, 1986; Banks *et al.*, 1995; Amarante y Banks, 2001).

2.3.3 Punto de compensación anaerobia (PCA)

La respiración es el proceso metabólico por el cual materiales orgánicos (carbohidratos, proteínas y grasas) son desdoblados en productos terminales simples, con liberación de energía útil para el desarrollo de diversos procesos bioquímicos. En este proceso, se utiliza oxígeno y se produce dióxido de carbono (Kader, 2007). De manera general, son tres las etapas en que se lleva a cabo la respiración; la primera corresponde a la hidrólisis de polisacáridos en azúcares simples, la segunda a la oxidación de azúcares a ácido pirúvico y por último la transformación aeróbica de piruvato y otros ácidos orgánicos en CO₂, agua y energía (Pantastico, 1975). Durante la respiración, la pérdida de reservas, ocasiona la aceleración de la senescencia, ya que son éstas las que proporcionan energía para mantener el estatus viviente del producto (Kader, 2007).

Dependiendo de la disponibilidad de oxígeno en el ambiente, se puede hablar de una respiración aeróbica o anaeróbica, en presencia o ausencia de O₂, respectivamente. La respiración aeróbica consiste en el rompimiento oxidativo de la reserva orgánica a moléculas más simples, incluyendo el CO₂ y agua, con

liberación de energía. El proceso consume O_2 en una serie de reacciones enzimáticas que toman lugar en la ruta metabólica de la glicolisis, ciclo de los ácidos tricarboxílicos y sistema asociado al transporte de electrones (Lee *et al.*, 1991; Fonseca *et al.*, 2002). Además, un metabolismo puede pasar de aerobio a anaerobio, cuando la concentración de oxígeno en el ambiente circundante se instala por debajo de los niveles marcados de tolerancia de O_2 para un producto determinado, generando así una caída de los niveles energéticos, disminuyendo la actividad enzimática y provocando la inducción de procesos de fermentación (respiración anaerobia) como único medio para producir la energía necesaria para continuar con los procesos bioquímicos.

En un ambiente determinado, cuando la disminución gradual de la concentración del oxígeno circundante llega a los niveles críticos, y se induce el cambio de metabolismo, activando la respiración anaerobia se habla del fenómeno “efecto Pasteur”, que se refiere a la condición en la cual la fermentación comienza y el etanol como producto de esta ruta bioquímica, tiende a acumularse. Este efecto es más recientemente denominado como límite de oxígeno más bajo o punto de inducción fermentativa (Petracek *et al.*, 2002). De otra manera, la más baja concentración de O_2 alrededor del producto, que no induce un proceso fermentativo, puede ser expresada como límite de O_2 externo más bajo, O_2 en el punto de rompimiento, punto de compensación anaeróbica, inducción del punto de fermentación anaeróbica o umbral de fermentación (Beaudry *et al.*, 1992; Talasalia *et al.*, 1994; Brencht *et al.*, 2002). De acuerdo con Peppelmbos y Rabbinge (1996) se concibe como “concentración óptima de O_2 ” a la concentración donde la respiración es

reducida a un mínimo sin la ocurrencia de desórdenes que pueden relacionarse con un abatimiento excesivo de las concentraciones del este gas.

En la práctica la tolerancia de un cultivo específico a bajos niveles de O_2 y/o altos niveles de CO_2 puede ser evaluada por; el comienzo de los procesos fermentativos con producción de etanol y acetaldehído, y el RQ (cociente entre la producción de CO_2 y la velocidad de consumo de O_2). Lee *et al.* (1991) reportan que el cociente respiratorio (RQ) se encontrara en un rango de 0.7 a 1.3 dependiendo del sustrato metabólico involucrado en el proceso respiratorio, y que bajo concentraciones aerobias el RQ sigue siendo relativamente constante, mientras que cuando los niveles de O_2 disminuyen y la fermentación es inducida, el RQ se incrementa debido a una mayor producción de CO_2 . Una mayor frecuencia de la fermentación ha permitido considerarla como un indicador adecuado de la transición del metabolismo aeróbico al anaeróbico, después de una reducción paulatina de la concentración de O_2 en el ambiente circundante o interno del producto almacenado.

Por todo lo anterior, resulta evidente puntualizar que en condiciones de almacenamiento de productos hortofrutícolas, es de suma importancia regular el intercambio de gases a través del envase utilizado, de manera que se logre un equilibrio en el transporte e instalación de los gases dentro del mismo, con una adecuada concentración de oxígeno y dióxido de carbono, que permita minimizar la intensidad de respiración del producto vegetal, evitando que niveles excesivamente bajos de O_2 y/o altos de CO_2 en el interior del envase, puedan activar la respiración anaerobia que conllevar a la aparición de olores y sabores indeseables en frutas y hortalizas con este tipo de manejo,

comúnmente referidos como la producción de metabolitos anaerobios, principalmente etanol y acetaldehído, y otras alteraciones fisiológicas (Meier *et al.*, 2004). Teniendo en cuenta que diferentes especies, tienen distinta tolerancia a elevado CO₂ y esto puede influenciar en su límite crítico de O₂ para almacenamiento en AM (Brencht *et al.*, 2002).

La literatura ha documentado varios casos con relación al efecto dañino que tiene la producción de metabolitos anaerobio (etanol y acetaldehído), en sistemas de almacenamiento en atmósferas modificadas o controladas, como productos de la inducción de fermentaciones anaerobias. Por mencionar, Agar *et al.* (1999) estudiaron la influencia de bajas concentraciones de O₂ en el metabolismo respiratorio de rodajas de kiwi frescas cortadas, encontrando un aumento en los contenidos de acetaldehído y etanol a los 12 días de almacenamiento, especialmente en rodajas conservadas bajo 0.5 kPa de O₂. Por otro lado, Piña *et al.* (2001) evaluaron un sistema de atmósferas controladas para combatir daños postcosecha en zarzamora (*Rubus* sp.) a tres distintos niveles de atmósferas (aire, 5% O₂ + 5% CO₂ y 15% O₂ + 20% CO₂), encontrando para las variables etanol y acetaldehído, que el contenido de etanol se incrementó significativamente respecto al valor inicial (66.96 mg·100mL⁻¹), alcanzando 180.41 mg·100mL⁻¹ después de 6 días a 2°C más 2 días al ambiente, siendo evidente el efecto de la senescencia con la acumulación de dicho metabolito. En cuanto a la influencia de las atmósferas establecidas, no se presentaron diferencias significativas en la acumulación de etanol entre éstas y la atmósfera normal. No obstante, una mayor acumulación

de etanol se presentó en los tratamientos con mayor concentración de CO₂, alcanzando niveles de 153.64, 182.35 y 194.86 mg·100mL⁻¹ después de 2, 4 y 6 días de almacenamiento a 2°C. Asociando ésta mayor acumulación de etanol al efecto de la AC establecida sobre la inducción de respiración anaeróbica. En frutos de ilama Ruiz-Sánchez (2007), con una propuesta de almacenamiento en atmósfera modificada, encontró que en frutos manejados con este sistema, la producción de metabolitos anaerobios fue significativamente mayor (6991.6 µmol·100mL⁻¹) a la de los frutos manejados en condiciones atmosféricas normales (2431.1 µmol·100mL⁻¹), situación que de acuerdo con el autor sugiere una condición crítica en la concentración instalada de O₂ estimulando la ruta fermentativa.

No obstante, una inadecuada instalación de las concentraciones de O₂ y CO₂, dentro de un envase determinado, puede propiciar la producción de metabolitos anaerobios, también se debe considerar que durante la maduración del fruto en el árbol y después de la cosecha, algunos procesos esenciales involucran la producción de acetaldehído y etanol, como generadores de volátiles del aroma y remoción de la astringencia del fruto. La producción de estos compuestos bajo condiciones aeróbicas es mucho menor que en situaciones anaeróbicas. Por lo anterior, de manera controlada, la presencia de tales compuestos puede ser benéfica para la expresión de ciertas características de calidad. Por ejemplo, Pesis (2005) reporta que en higos estos metabolitos anaerobios, inducen la maduración, mientras que en plátano y persimonia remueve la astringencia, y en uva incrementan las antocianinas.

2.3.4 Almacenamiento en atmósfera modificada con sistema microperforado

La propuesta de usar films microperforados para el envasado de frutas y hortalizas con elevada actividad respiratoria, permite aumentar el transporte gaseoso a través de la matriz plástica, ya que estas películas presentan una velocidad de transmisión muy similar para el O_2 y CO_2 , con lo que se pueden lograr relativamente altas concentraciones de CO_2 (10%), sin llegar a niveles de O_2 críticos por su proximidad a las condiciones anaerobias. Este diseño permite un intercambio de gases muy superior al de los films convencionales (Renault *et al.*, 1994). Lo anterior, tomando en cuenta que a través de las perforaciones la relación entre las permeabilidades a CO_2 y O_2 es próxima a 1, mientras que en films poliméricos intactos esta relación se encuentra entre 3 y 6 (Brody, 2005; González-Aguilar *et al.*, 2005).

Montanez *et al.* (2005) mencionan que el almacenamiento en atmósfera modificada con base en sistemas plásticos con perforaciones, consiste en el almacenamiento de un producto fresco en un envase hermético perforado por uno o más conductos. Actualmente, el uso de películas perforadas se está incrementando con la aplicación del almacenamiento en atmósferas modificadas para productos frescos, debido a que ésta nueva propuesta está constituyendo una importante modificación a la forma tradicional de implementación de una atmósfera modificada en envases de materiales poliméricos intactos. Renault *et al.* (1994) evaluaron el intercambio de gases en empaques microperforados usados en almacenamiento con sistema de AM, usando las leyes de Stephan-Maxwell y Ley de Fick, para el modelando

numérico del sistema. La respiración de frutos y vegetales fue aproximada mediante la cinética de Michaelis-Menten dependiente de la concentración de O_2 . La concentración de equilibrio fue alcanzada después de 2 a 3 días, dependiendo del volumen libre y de las propiedades de difusión del empaque, así como del número de perforaciones, el diámetro de las perforaciones y espesor de la película, así como la temperatura del sistema. Encontraron que si el O_2 alcanza una concentración de 10%, la operación era adecuada a 10°C pero con 20°C podía haber anaerobiosis, debido al incremento en la tasa de respiración del fruto.

Esta nueva propuesta de envasado surge como alternativa de manejo para productos que requieren mayor difusión a gases, por presentar una alta tasa respiratoria, regulando de ésta manera la permeabilidad del sistema, para evitar problemas de fermentación, y con ello todos sus efectos perjudiciales sobre la vida de anaquel de los productos hortofrutícolas (Kader y Watkins, 2000). En la literatura se reportan algunos trabajos que muestran el efecto benéfico de los sistemas microperforados sobre distintas características de calidad en productos almacenados bajo esta propuesta. Ares *et al.* (2006) evaluaron la influencia de una atmósfera modificada pasiva, sobre las características sensoriales y vida útil de “Shiitake” (*Lentinula edodes*). Los hongos fueron almacenados bajo aire atmosférico en 3 diferentes películas; polietileno de baja densidad, polipropileno y película de polipropileno perforado, las bolsas fueron almacenadas a 5°C por 16 días, se determinó; la velocidad de respiración, composición de las condiciones de almacenamiento en atmósfera modificada y la pérdida de peso. Los resultados obtenidos mostraron que los hongos

almacenados con película de polipropileno perforado presentaron menor deterioro, que los almacenados bajo atmósfera modificada solamente. Villaescusa y Gil (2003) realizaron la evaluación de la calidad de hongos *Pleurotus ostreatus* en condiciones de atmósfera modificada a 4°C por 7 días, usando películas de polipropileno microperforado, polietileno de baja densidad y cloruro de polivinilo. Concluyendo, que debido al alto índice de respiración de los hongos, el envasado en atmósferas modificadas con microperforaciones, favorece para extender la vida de anaquel del producto. Mohamed y Othman (1998) señalan que el color rojo en frutos de rambután se retiene con AM, ya que esta condición inhibe su oscurecimiento. Éstos coinciden con los reportados por Lee y Leong (1982) quienes estudiaron el efecto de bolsas de polietileno con microperforaciones sobre la calidad de rambután cv. “Jilee”, y encontraron que después de 7 días a 10°C los frutos aun mantenían una buena calidad y el color rojo del pericarpio.

2.3.5 Efecto de las atmósferas modificadas creadas con películas plásticas sobre las variables físicas y fisiológicas del producto envasado

La aplicación de las AM mantiene la calidad y extiende la vida de anaquel de los productos almacenados con esta tecnología, ya que retrasa la senescencia y los cambios bioquímicos y fisiológicos asociados a ella (Kader, 1992). Además, disminuye los desórdenes fisiológicos causantes del proceso de oscurecimiento y de daños por frío. Por ejemplo, en el almacenamiento con películas plásticas de diferente espesor (0.01, 0.04 y 0.08 mm) para frutos de rambután cultivar “Rongrieng” almacenados a 13°C se retardo el oscurecimiento de las

protuberancias y extendió la vida de anaquel del fruto. Los frutos almacenados en bolsas de 0.01 y 0.04 mm tuvieron una vida de anaquel de 18 días, los almacenados en bolsas de 0.08 mm de 16 y el testigo de solo 12 días. La vida de anaquel de los frutos testigos estuvo limitada por la disminución del color, mientras que la vida de anaquel de las AM estuvo limitada por el desarrollo de enfermedades.

En condiciones de almacenamiento bajo un ambiente controlado, la pérdida de agua o transpiración es un importante proceso fisiológico que afecta a las principales características de calidad de las frutas y hortalizas frescas, entre ellas la apariencia y la textura. Una pérdida de peso de solo 5% puede causar apariencia de marchitez en la superficie de los frutos (Mahajan *et al.*, 2007). Por ejemplo, la pérdida de agua en pimientos y chiles ha sido identificada como el principal factor fisiológico limitante para prolongar su almacenamiento y calidad (Maalekuu *et al.*, 2003). Además de los cambios en apariencia (deshidratación), textura y turgencia, la pérdida de agua resulta finalmente en la pérdida cuantitativa del producto. Meller y Anderson (1976) mencionan que la pérdida de peso por deshidratación se manifiesta en los productos hortícolas por marchitamiento y encogimiento. Además, la deshidratación provoca alteraciones en el color. Una velocidad de aire y humedad relativa no apropiada durante el almacenamiento en sistemas refrigerados combinados con AM o AC resulta ser un factor que puede contribuir a la pérdida de peso por deshidratación de los frutos, por lo que resulta de particular importancia tener el control de estas variables en condiciones de almacenamiento, usando cámaras

de refrigeración con aire forzado. Shilaong *et al.* (2002) mencionan que la HR dentro de las bolsas de polietileno es el principal factor que reduce la transpiración, mientras que la modificación de la composición de los gases puede ser un factor secundario. Por su parte, Boonyaritthongchai y Kanlayanarat (2003) señalan que altas concentraciones de CO₂ reducen la apertura de los estomas, un factor que contribuye al intercambio de CO₂ y O₂ durante la respiración, hecho que también puede ayudar a reducir la pérdida de humedad y peso.

Con relación a la pérdida de peso, Kanlanarayath *et al.* (2000) reportan que frutos de rambután almacenados en bolsas de polietileno de diferente grosor presentaron pérdidas de peso menores a 1%, mientras que la pérdida de peso en los frutos testigo fueron mayores al 25%. En otro estudio para el mismo fruto, las pérdidas de peso de los frutos almacenados en bolsas de polietileno de baja densidad con 0, 1, 3 y 6 orificios de ventilación aumento con el número de orificios, siendo esta perdida en todos los casos menor al 5% y para el testigo de 20% al final del periodo de almacenamiento (10 días) (SriLaong *et al.*, 2002). Por su parte, Boonyaritthongchai y Kanlayanarat (2003) indican que frutos almacenados en AM redujeron considerablemente su pérdida de peso al presentar únicamente 2% de pérdida a los 16 días después del periodo de almacenamiento y los frutos testigo perdieron 3.8% a los dos días y 11% a los 10 días.

Los cambios de color durante la senescencia son altamente influenciados por las condiciones de almacenamiento. En un almacenamiento con alto CO₂ y bajo

O₂ se reduce la pérdida de clorofila y otros pigmentos, incluyendo antocianinas, licopeno, xantofilas y otros (Hernández, 2003). Boonyaritthongchai y Kanlayanarat (2003) reportaron que el oscurecimiento de las protuberancias y pericarpio de frutos de rambután almacenados a 13°C con una atmósfera normal, se presentó después de los 6 días de almacenamiento, mientras que los frutos almacenados en AM a los 10 días, y que el pericarpio de los frutos almacenados en la AM mantuvo mayor luminosidad que los mantenidos en el aire normal.

Para frutos de aguacate la información proporcionada sugiere que el almacenamiento de estos frutos en atmósfera modificada se traduce en tiempo de vida de anaquel y niveles de firmeza mayores. Berrios (2002) comparó el almacenamiento de frutos de aguacate “Hass” en dos sistemas de atmósfera modificada (dinámica y pasiva), encontrando que en un sistema dinámico hubo una manifestación menor del metabolismo anaerobio que en el sistema pasivo, lo cual fue detectado por una concentración menor de etanol y acetaldehído en el ambiente inmediato al fruto. Por su parte Xiao y Kiyota (2002) evaluaron para el mismo material vegetal distintos espesores de película plásticas (40 µm de polietileno de baja densidad, 20 µm de polipropileno orientado y 40 µm poliestireno) encontrando en general un efecto positivo en la reducción de daños por frío, en la pérdida de peso y la reducción del ablandamiento. Los mejores resultados fueron con los espesores de película más bajos. En el almacenamiento de mitades de frutos de aguacate variedad “Fuerte” Gerdes y Parrino-Lowe (1995) usaron bolsas de polietileno laminado y tratamientos con

soluciones de ácido cítrico para evitar efectos de la actividad de la enzima polifenoloxidasa, y aun cuando las muestras presentaron obscurecimiento del mesocarpio, el efecto del almacenamiento fue positivo, pues las mitades empacadas resultaron al cabo de 21 días, más firmes que aquellas de frutos frescos no almacenados en la forma indicada. Baskaran *et al.* (2002) almacenaron frutos de aguacate con recubrimientos a base de ceras (6%) y coberturas plásticas de polietileno de baja densidad. Al cabo de 4-5 semanas a $8 \pm 2^{\circ}\text{C}$ los frutos se encontraban aun verdes, firmes y en buena condición.

Mohamed y Otman (1988) por su parte han señalado que altas concentraciones de CO_2 suprimen la respiración y con ello la producción de enzimas responsables de la degradación de las pectinas, por lo que se disminuye el ablandamiento de los frutos. Se ha señalado que una concentración de 10% de CO_2 por un periodo de tiempo breve, se considera óptima para retardar la pérdida de la estructura celular tanto de la pulpa como del pericarpio de los frutos, pero la misma concentración aplicada por un periodo de almacenamiento prolongado reduce la vida de anaquel. Potter y Hotchkiss (1995) mencionan que la firmeza y forma de los frutos no permanecen constantes, debido fundamentalmente a los cambios en su contenido de agua (perdida de turgencia), y a la ruptura de la pared celular como parte del proceso natural de maduración. Estos cambios se deben a una aparente disolución de la región de la lámina media de la pared celular rica en pectina (Seymour *et al.*, 1993). En general, las sustancias pépticas totales se incrementan durante el desarrollo de los frutos pero durante la madurez el contenido de estos compuestos decrece y

con estos cambios la firmeza de los frutos también se ve afectada (Pantastico, 1975).

Con relación al efecto que tiene una AM sobre la tasa respiratoria de los productos hortofrutícolas Kays (1997) menciona que altas concentraciones de CO₂ pueden alterar la ruta glicolítica afectando la actividad del ATP, la fosfofructoquinasa, la piruvato quinasa e inhibir la succinato deshidrogenasa en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos (Ke *et al.*, 1993). Y con esta situación, se activa la vía alternativa, por la actividad de la oxidasa alternativa o por inactivación de la citocromo oxidasa (Watkins, 2000). La exposición a altas concentraciones de CO₂ también pueden bajar el pH del citoplasma, hasta el punto donde el metabolismo normal es interrumpido (Mathooko, 1996). Silaong *et al.* (2002) señalan que altas concentraciones de CO₂ alteran la producción y acción del etileno, debido a que el CO₂ es un inhibidor competitivo del sitio activo del etileno, además altas concentraciones de CO₂ y bajas de O₂ suprimen la expresión de los genes de la ACCsintasa y los niveles de transcripción de la misma, inhibiendo con ello la actividad de esta enzima en la ruta bioquímica para la producción de etileno. De acuerdo con Burg y Burg (1967) cuando la presión parcial de O₂ se reduce aproximadamente a 2.8 kPa la respuesta al etileno es reducida en un 50%. Yang y Hofman (1984) determinaron que la producción de etileno a partir del ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico es una reacción catalizada por una ACCoxidasa fuertemente dependiente del oxígeno que se inhibe con bajas concentraciones del mismo.

La experiencia en el manejo de frutos de ilama en un sistema de atmósfera modificada, con relación a los cambios físicos y fisiológicos que este fruto experimenta, muestra de acuerdo con Ruíz-Sánchez (2007) como el manejo de ilamas a 20°C y una atmósfera modificada (1% de O₂ y 10% de CO₂), reduce la pérdida fisiológica de peso, mantiene los valores de firmeza y permite el manejo de material con color más homogéneo. Sin embargo, el espesor de la película plástica usada que correspondió a 33 µ, propicio que el intercambio de gases de la atmósfera dentro del envase con el ambiente externo, fuera insuficiente para evitar el desarrollo del metabolismo fermentativo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Origen, características y acondicionamiento del material vegetal

Se emplearon frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) de pulpa rosa, cosechados en las comunidades de Nueva Filadelfia y San Lorenzo en Ciudad Altamirano, Guerrero (figura 9). Al día de la cosecha los frutos contaban con 85 días después de floración (DDF). Lo anterior, de acuerdo a información proporcionada por los dueños de los árboles de los cuales se obtuvo el material vegetal.



Figura 9. Frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) con pedúnculo y follaje cosechados a 85 DDF, en las instalaciones del laboratorio de Investigación del Departamento de Ingeniería Agroindustrial, UACH.

La cosecha de ilama con 85 DDF permitió obtener frutos antes de que estos presentaran apertura del pericarpio y desprendimiento del pedúnculo, conservándolo unido al fruto, característica que de manera habitual no es permitida por los dueños de los árboles de *Annona diversifolia* Saff., por considerar que el punto óptimo para la cosecha en madurez comestible y comercial, es precisamente cuando estos presentan apertura del pericarpio y desprendimiento del pedúnculo.

Se trabajó con material vegetal proveniente de distintos árboles, establecidos como cercas vivas en los huertos en los hogares de los habitantes de la zona, así como de algunos árboles localizados en el monte, lo cual constituyó un factor de heterogeneidad en el material vegetal experimental empleado. Las ilamas tuvieron diferencias principalmente en tamaño. Además, algunos frutos mostraron visible manchado en la cáscara, como síntoma de presencia de antracnosis e insectos.

El traslado de los frutos al laboratorio de Investigación, en el Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Autónoma Chapingo, se llevó a cabo el mismo día de la cosecha en campo para comenzar con la instalación de la fase experimental. Para el traslado de las ilamas del campo al laboratorio, se usaron rejas de plástico previamente desinfectadas, dentro de las cuales se colocaron los frutos alternados con follaje y periódico para evitar lesiones en los frutos durante el traslado. Como parte del manejo del fruto, durante la cosecha, se eligió conservar 10 cm de pedúnculo unido al fruto, y algunas hojas. Una hora después de la llegada del material vegetal a las instalaciones del

laboratorio de Investigación, los frutos se lavaron por inmersión en agua clorada con hipoclorito de sodio a una concentración de $200 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$.

3.2 Organización experimental de la investigación

En primer lugar se exploró el efecto de la intensidad del microperforado sobre las condiciones de operación del sistema de atmósfera modificada empleado, referente a los términos de cambio de las concentraciones de O_2 y CO_2 instaladas dentro del envase plástico de polietileno de baja densidad de venta comercial usado para crear la AM, con permeabilidad a O_2 de $2.7 \times 10^{-15} \text{ mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$, $9.9 \times 10^{-15} \text{ mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$ para CO_2 y permeabilidad a vapor de agua de $868 \text{ mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{kPa}^{-1}$ (Cameron *et al.*, 1995). Esto se desarrolló a dos temperaturas independientes de almacenamiento 20°C y 12°C . Se consideró como unidad experimental (UE) a un fruto independiente dentro de su respectivo envase plástico, evaluado por triplicado para cada tratamiento. Los tratamientos consistieron en la combinación de las dos condiciones térmicas de almacenamiento con el envasado en; bolsas intactas, 5, 10 y 20 microperforaciones. La posterior caracterización física y metabólica en relación a la tasa respiratoria y producción de etileno se realizó en los mismos frutos en condiciones ambientales normales y 20°C .

3.2.1 Evaluación del efecto de la intensidad de microperforado sobre las condiciones de operación de la atmósfera modificada

3.2.1.1 Desarrollo experimental. Con los frutos colocados por separado dentro de la película plástica, se formaron ocho lotes con tres UE cada uno, que

corresponden a las repeticiones por tratamiento, y que representan a los bloques de análisis en el diseño experimental. Los lotes se denominaron A20, B20, C20, D20, A12, B12, C12 y D12. Las letras representan el número de perforaciones en las bolsas: A= 0 perforaciones, B, C, y D corresponden a 5, 10 y 20 perforaciones respectivamente. Los número 20 y 12 se refieren a las dos temperaturas de almacenamiento.

Dentro de cada bolsa, junto con el fruto, se agregaron 12 tubos (Vacutainer®) con sus respectivas tapas para muestreo de la atmósfera interna del envase. Los tubos se rotulados (a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k y l) para control del monitoreo de la cinética de cambio de los gases en la atmósfera interna del envase con relación al tiempo transcurrido, en el periodo total de tiempo de muestreo establecido. Todas las UE A20, B20, C20 y D20 se colocaron en un ambiente a 20°C y las UE de los lotes A12, B12, C12 y D12 en una cámara de refrigeración independiente a 12°C (figura 10 y 11).



Figura 10. Unidades experimentales con distintos tratamientos de microperforado y serie de 12 tubos para muestreo de atmósfera instalada en condición térmica de 12°C.



Figura 11. Unidades experimentales con distintos tratamientos de microperforado y serie de 12 tubos para muestreo de atmósfera instalada en condición térmica de 20°C.

En ambas condiciones térmicas, dentro de las cámaras de refrigeración las UE permanecieron con el envase abierto durante 5 horas, en contacto con la condición ambiental de la cámara, para facilitar el acondicionamiento térmico de los frutos.

Posteriormente las bolsas, se cerraron herméticamente, y con intervalos de 1 h en la condición de 20°C y 2 h en la de 12°C se realizó el cierre de cada uno de los tubos de muestreo de la serie de 12(a-l) colocados dentro de los envases. Lo anterior, para capturar muestras del cambio de ambiente en cada uno de los tratamientos, y determinar a distintos tiempos, las variaciones en concentración de O_2 y CO_2 en la atmósfera interna instalada dentro de los envases. Transcurrido el tiempo total de monitoreo, se recolectaron todos los tubos de

muestreo y se almacenaron en refrigeración (4°C) hasta el momento del análisis instrumental de la atmósfera capturada.

Para la determinación de las concentraciones de O₂ y CO₂ instaladas en el sistema de atmósfera modificada, para cada tratamiento de microperforado y condición térmica, se siguió un procedimiento instrumental de cromatografía de gases, como se explica más adelante en la metodología para evaluar condiciones de operación, y con las concentraciones determinadas en ese procedimiento, se construyeron gráficas de cinética de cambio de concentración de O₂ y CO₂ con relación al tiempo. Además, los datos se sometieron a regresión no lineal para ajustarlos a modelos con la forma de la siguiente Ecuación (1):

$$Y = y_0 + a [1 - \exp (-bt)] \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

Y = concentración (%) de O₂ o CO₂ dentro del envase plástico a un tiempo t (h)

y₀ = concentración inicial (%) de O₂ o CO₂

a (%) y b (h⁻¹) = constantes características

De acuerdo con Valle-Guadarrama *et al.* (2002) la suma de los parámetros y₀ y a corresponde a la asíntota de la curva que representa la cinética y por tanto proporciona la concentración de O₂ y CO₂ que se instala dentro del envase, la cual se ha denotado como y_α en el presente trabajo.

3.2.1.2 Análisis de datos. Las variables respuesta fueron las concentraciones de O_2 y CO_2 , las cuales se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia estadística del efecto de los tratamientos (combinación de las condiciones térmicas de almacenamiento, intensidad de microperforado y distintos tiempos de muestreo) sobre dichas variables, además se realizó un procedimiento de comparación múltiple de medias con la prueba de Scheffe ($p \leq 0.05$). Los dos procedimientos, ejecutados mediante el programa Statistical Analysis System (SAS V.9) (SAS Institute, 1990). Los datos generados en esta fase experimental se analizaron bajo un diseño experimental en bloques completos al azar (DBCA) con arreglo factorial $2 \times 4 \times 6$ con 48 tratamientos a probar, donde los bloques están definidos por las tres repeticiones independientes evaluadas para cada tratamiento. El arreglo factorial del diseño experimental se planteó para investigar no solo la acción independiente de los factores estudiados en sus distintos niveles sobre las variables respuesta, sino también para valorar el efecto de las interacciones entre factores, a través de todas las combinaciones posibles de sus niveles de evaluación.

Las especificaciones para el diseño experimental en bloques completos al azar (DBCA) con arreglo factorial $2 \times 4 \times 6$ se indican a continuación:

a). Factores y niveles

Factor A = Efecto de la condición térmica de almacenamiento refrigerado con dos niveles de evaluación ($a_1 = 12^\circ C$ y $a_2 = 20^\circ C$).

Factor B = Efecto de la intensidad de microperforado con cuatro niveles de evaluación ($b_1 = AM0\mu P$, $b_2 = AM5\mu P$, $b_3 = AM10\mu P$ y $b_4 = AM20\mu P$).

Factor C = Efecto de la estación de muestreo con intervalos de dos horas, con seis niveles ($c_1 = 9:30$ p.m., $c_2 = 11:30$ p.m., $c_3 = 1:30$ a.m., $c_4 = 3:30$ a.m., $c_5 = 5:30$ a.m. y $c_6 = 7:30$ a.m.).

b). El modelo lineal

$$Y_{ijkl} = \mu + Blo_l + A_i + B_j + C_k + (A_i * B_j) + (A_i * C_k) + (B_j * C_k) + (A_i * B_j * C_k) + e_{ijkl}$$

Donde: $i = 1, 2, \dots, a$ $j = 1, 2, \dots, b$ $k = 1, 2, \dots, c$ $l = 1, 2, \dots, r$

a = Número de niveles del factor A

b = Número de niveles del factor B

c = Número de niveles del factor C

r = Número de bloques (repeticiones)

Y_{ijkl} = Respuesta obtenida en el i -ésimo nivel del factor A, el j -ésimo nivel del factor B y el k -ésimo nivel del factor C, ubicados en el l -ésimo bloque

μ = Efecto medio general

Blo_l = Efecto atribuido al l -ésimo bloque

A_i = Efecto atribuido al i -ésimo nivel del factor A

B_j = Efecto atribuido al j -ésimo nivel del factor B

C_k = Efecto atribuido al k-ésimo nivel del factor C

(A_i*B_j) = Efecto atribuido a la interacción entre el i-ésimo nivel del factor A y el j-ésimo nivel del factor B

(A_i*C_k) = Efecto atribuido a la interacción entre el i-ésimo nivel del factor A y el k-ésimo nivel del factor C

(B_j*C_k) = Efecto atribuido a la interacción entre el j-ésimo nivel del factor B y el k-ésimo nivel del factor C

$(A_i*B_j*C_k)$ = Efecto atribuido a la interacción entre el i-ésimo nivel del factor A, j-ésimo nivel del factor B y el k-ésimo nivel del factor C

e_{ijkl} = Término de error aleatorio

3.2.2 Caracterización física y metabólica de ilama

3.2.2.1 Desarrollo experimental. Una primera etapa consistió en realizar la caracterización del material vegetal, trabajando sobre una muestra de 5 frutos de ilama, a los cuales se les determinó por triplicado las variables; peso, volumen, color, firmeza, °Brix, acidez y azúcares totales. Y por otro lado, a una muestra de 5 frutos a 20°C, el seguimiento diario por 15 días de las variables; peso, tasa respiratoria y producción de etileno.

3.2.2.2 Análisis de datos. Los datos numéricos obtenidos para la caracterización física de la ilama, se analizaron empleando solamente medidas de tendencia central. Por otro lado, el manejo de los datos generados por la evaluación de las

variables; peso, respiración y producción de etileno, se hizo con un análisis de varianza (ANOVA) considerando un diseño experimental completamente al azar (DCA) con un nivel de significancia de 5%, para determinar la significancia estadística de los tiempos de muestreo sobre las variables respuesta y cómo cambian éstas con relación al tiempo transcurrido, además de la comparación de medias con la prueba de Scheffe ($p \leq 0.05$).

Las especificaciones para el diseño experimental completamente al azar (DCA), para la evaluación de las variables; peso, respiración y producción de etileno, durante quince días de tratamiento, en una muestra de 5 frutos que corresponden a las repeticiones independientes de dichos tratamiento, se describe a continuación:

a). Modelo lineal: $Y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij}$

Donde: $i = 1, 2, \dots, t$ $j = 1, 2, \dots, r_i$

t = Número de tratamientos, r_i = Número de repeticiones para el i -ésimo tratamiento, Y_{ij} = Respuesta obtenida en la j -ésima repetición del i -ésimo tratamiento, μ = Efecto medio general, T_i = Efecto atribuido al i -ésimo tratamiento y e_{ij} = Término de error aleatorio.

3.3 Metodologías de análisis de las variables respuesta

3.3.1 Variables físicas y químicas

3.3.1.1 Peso. Para determinar esta variable en los frutos de ilama, y calcular las pérdidas del mismo, se utilizó una balanza portátil (Ohaus, USA) con precisión

de 0.1 g. Los resultados se expresaron como porcentaje de peso perdido, de acuerdo a la siguiente expresión (Lester y Burton, 1986):

$$\% \text{ PP} = ((\text{Peso inicial} - \text{Peso final}) / (\text{Peso inicial})) * 100 \dots\dots\dots(2)$$

Donde: PP = porcentaje de pérdida de peso (%), Peso inicial [=] g o kg y Peso final o al momento de la evaluación [=] g o kg

3.3.1.2 Volumen. Se determinó por inmersión de los frutos en agua en un recipiente graduado con capacidad de 3 litros.

3.3.1.3 Color. Se evaluó instrumentalmente mediante un colorímetro Hunter Lab modelo Mini Scan XE Plus No.45/0-L, con iluminación estándar D65, ángulo de observador de 10° y escala CIEL*a*b*, calibrado con placa de cerámica negra y blanca. Las lecturas se realizaron en las UE por triplicado sobre la pulpa de los frutos de ilama homogenizada y colocada en una celda de acrílico de 25 mL de capacidad.

En las determinaciones, el componente “L*” corresponde a la luminosidad o brillantez, valores de 0 representan colores totalmente oscuros (negro) y valores de 100 corresponde a colores claros (blanco) con la máxima brillantez. El parámetro “a*” define el componente rojo-verde, con valores positivos (+) representan al rojo y negativos al verde (-). El elemento “b*” define el componente amarillo-azul, los valores positivos (+) para el amarillo y valores negativos (-) para el azul (deMan, J. M., 1999). Los datos de color se expresaron como luminosidad (L), Chroma y Hue (McGuire, 1992). La luminosidad es la capacidad de reflejar la luz, la saturación es la pureza del

color descrita por el Chroma y el tono descrito por el Hue es el color propiamente dicho. Los colores serán más saturados cuanto más separados se encuentren del centro del gráfico los puntos que lo definen (Calvo y Duran, 1997). El chroma o pureza de color tomará valores de 0 en el centro aumentando conforme lo hace la distancia de ubicación de los puntos. El ángulo de tono tendrá unidades de grados, correspondientes a la ubicación de los tonos; rojo, amarillo, verde o azul.

Se calculó el ángulo de tono o matiz (Hue) mediante la expresión:

$$\text{Hue} = \arctan b^*/a^* \dots\dots\dots(3)$$

La saturación o cromaticidad:

$$\text{Chroma} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \dots\dots\dots(4)$$

Mientras que el valor de L^* se tomó directamente como luminosidad (Minolta, 1994; Hutchings, 1999).

3.3.1.4 Firmeza. Se midió en la pulpa de los frutos de ilama sin cascara, sobre tres distintos puntos de la zona ecuatorial. Expresando las lecturas en unidades de Newton (N), como promedio de los tres puntos evaluados en cada UE. Se empleó un analizador de textura (Stable MicroSystems, UK, Modelo TA-TX2i) con un aditamento cilíndrico y una rutina de medición de fuerza por compresión con distancia de penetración de 5 mm y velocidad de ensayo $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.3.1.5 Sólidos solubles totales. La evaluación de esta variable se hizo de acuerdo a la metodología reportada por la AOAC (1990). Usando para ello un

refractómetro digital portátil PAL-1 (ATAGO, USA) con rango de 0 a 53°Brix y compensación automática de temperatura, expresando el contenido de sólidos solubles totales en °Brix a 20°C. Para ejecutar el procedimiento, se calibró el equipo con agua destilada y se extrajo jugo de la pulpa de los frutos de ilama, de cada unidad experimental destinada a esta evaluación, una gota del jugo se colocó en el sensor del refractómetro para tomar la lectura directamente en °Brix.

3.3.1.6 Acidez titulable. Se obtuvo por el método reportado en la AOAC (1990) basado en la cuantificación de los ácidos orgánicos libres en una muestra por neutralización de los mismos con una base fuerte. Para ello, se licuaron 10 g de muestra de pulpa de ilama en 50 mL de agua destilada, posteriormente se midió el volumen total resultante y se filtró con ayuda de gasa para separar los sólidos contenidos en la muestra. Del líquido filtrado se tomó una alícuota de 10 mL a la cual se adicionaron tres gotas de fenolftaleína al 1%, y con una pipeta se agregaron de manera constante gotas de NaOH al 0.01N, hasta que el extracto se tornó de color rosa pálido, y este color se mantuvo sin desaparecer a un pH aproximado de 8.3, momento en el cual se cuantificó el gasto volumétrico de NaOH para realizar los cálculos correspondientes. En este caso, el cálculo del porcentaje de acidez titulable se realizó y expresó con base al ácido cítrico, como gramos (g) de ácido cítrico por 100 g de pulpa, empleando para ello la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Ácido cítrico} = ((\text{mLNaOH} \cdot \text{N} \cdot \text{Meq.Ac} \cdot \text{V}) / (\text{peso de la muestra}) \cdot (\text{alícuota})) \times 100 \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

mL NaOH = Gasto volumétrico de NaOH (mL)

N = Normalidad NaOH

Meq. Ac = Miliequivalentes del ácido que se encuentra en mayor proporción en el fruto (ácido cítrico $0.064 \text{ mg meq}^{-1}$).

V = Volumen total de extracto después de licuar la muestra (mL)

Para obtener los miliequivalentes se consideró la siguiente fórmula:

$$\text{Meq. Ac.} = \text{PM ácido orgánico} / \text{Valencia} \times 1000 \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

PM ácido orgánico = peso molecular del ácido cítrico 192.1 g

Valencia del ácido cítrico = 3

3.3.1.7 Azúcares totales. Se hizo empleando el método colorimétrico de Antrona (figura 12) (Whitam *et al.*, 1971).



Figura 12. Reacción ácida colorimétrica con 10 puntos de dilución de solución estándar de glucosa (15 mg/100 mL) con reactivo antrona.

El principio del método se basa en una digestión ácida de la muestra que contiene los azúcares que se desean valorar, posterior a su extracción del material vegetal por destilación en alcohol etílico al 70%, en una solución previamente preparada de reactivo antrona en ácido sulfúrico que al reaccionar con los azúcares presentes en la muestra valorada resultará en una mezcla líquida con una reacción colorimétrica de tono azul, cuya intensidad dependerá de la concentración de azúcares totales que se encuentre en la muestra.

La figura 13 muestra el modelo matemático de ajuste que relaciona las concentraciones de azúcar en las diluciones preparadas y sus correspondientes lecturas de absorbancia después de la reacción.

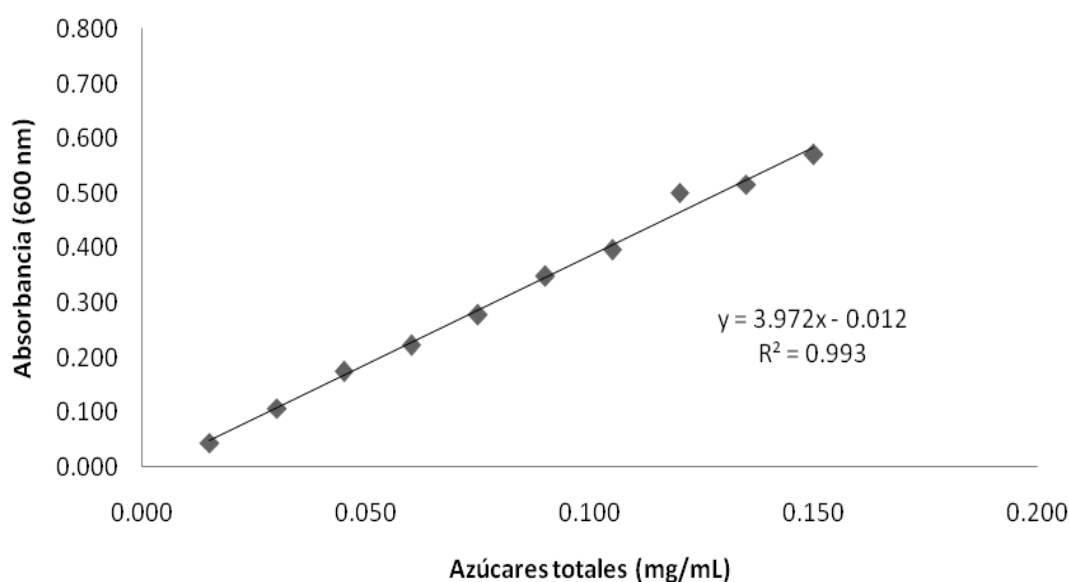


Figura 13. Curva tipo para la evaluación de azúcares totales por el método colorimétrico de Antrona (Whitam *et al.*, 1971).

La relación entre la intensidad del color de la mezcla reactante con el contenido de azúcares totales en la muestra problema evaluada, se da por la absorbancia

a 600 nm registrada en un espectrofotómetro. Para obtener el modelo matemático que explica dicha relación, entre la absorbancia y la concentración de azúcares totales, se preparó una curva tipo con 10 puntos de dilución a partir de solución estándar de glucosa con 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1 mL de solución madre de glucosa (dilución de 15 mg de glucosa aforada a 100 mL de agua destilada) aforados a 3 mL de agua destilada.

3.3.1.8 Valoración del espesor. Para determinar el espesor de los films de polietileno de baja densidad usados para crear la condición de atmósfera modificada en el almacenamiento de frutos de ilama, se empleo un tornillo micrométrico marca Starret (The L.S Starret Co. LTD).

El procedimiento consistió en obtener 5 muestras del material plástico con dimensiones de 2 cm x 2 cm para colocarlas en forma alternada entre cubreobjetos de vidrio. A todo el conjunto se le determinó su espesor y se registro la lectura, posteriormente las muestras de film fueron retiradas del conjunto de cubreobjetos al cual se le volvió a determinar el espesor. El espesor del film plástico se obtuvo restando la medida del espesor sin muestras a la medida con muestras del film y dividiendo entre cinco.

3.3.2 Variables fisiológicas

3.3.2.1 Condiciones de operación. En términos de las concentraciones de O₂ (%) y CO₂ (%) monitoreadas dentro del sistema de envasado. Se empleó un cromatógrafo de gases (Varian modelo 3400CX, USA) equipado con columna capilar Chrompack® tipo poraplot Q, detector de conductividad térmica (TCD) y

detector por ionización de flama (FID). Las condiciones de trabajo del cromatógrafo fueron 80°C en columna, 150°C en inyector y 170°C en detectores. Para la cuantificación del O₂ se auxilió con un estándar de calibración (Praxair de México S.A. de C.V.) con 2.01% O₂. Además, para el CO₂ se construyó una curva tipo, empleando tubos Vacutainer® con 7 mL de capacidad, dentro de los cuales se diluyeron cantidades medidas de CO₂ de alta pureza (99.8% Praxair de México S.A. de C.V.) con volúmenes determinados de aire atmosférico normal para formar mezclas con 0.03, 2.93, 5.66, 8.24, 10.69, 11.86, 13.01, 15.21, 17.30, 19.29, 20.25, 21.19 y 23 % CO₂. En todos los casos se realizó la inyección de las muestras gaseosas al cromatógrafo de gases con jeringas de vidrio para gases (Hamilton®) en alícuotas de 100 µL.

3.3.2.2 Tasa respiratoria y tasa de producción de etileno. En términos de producción de CO₂ (g_{CO2}) y producción de etileno (g_{C2H4}) expresados en kg_{gas} kg_{fruto}⁻¹ s⁻¹ con base en las Ecuaciones (7) y (8):

$$g_{CO_2} = (y_{CO_2}^f - y_{CO_2}^i) * V_L * p_{tot} * M_{CO_2} / m * t_r * R * (T + 273.15) \dots \dots \dots (7)$$

$$g_{C_2H_4} = (y_{C_2H_4}^f - y_{C_2H_4}^i) * V_L * p_{tot} * M_{C_2H_4} / m * t_r * R * (T + 273.15) \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

(y_{CO2}^f - y_{CO2}ⁱ) y (y_{C2H4}^f - y_{C2H4}ⁱ) son las concentraciones (fracción volumen) final (superíndice *f*) e inicial (superíndice *i*) de CO₂ y C₂H₄, evaluadas por cromatografía de gases. En las mismas ecuaciones V_L (m³) representa el volumen libre del recipiente empleado para establecer el sistema estático, p_{tot} es la presión total (considerando que la presión atmosférica en Chapingo es de 77993.0 Pa), T es la temperatura (°C), R es la constante de los gases ideales

($8314.4 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{mol}}\cdot\text{K}^{-1}$), m es la masa del producto (kg), t_r es el tiempo (s) de evaluación, M_{CO_2} es el peso molecular del CO_2 ($44 \text{ kg}_{\text{masa}}\cdot\text{kg}_{\text{mol}}^{-1}$) y $M_{\text{C}_2\text{H}_4}$ el peso molecular del etileno ($28.054 \text{ kg}_{\text{masa}}\cdot\text{kg}_{\text{mol}}^{-1}$). Todo lo anterior, para obtener los resultados de la producción de ambos gases en $\text{kg}_{\text{CO}_2}\cdot\text{kg}_{\text{fruto}}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ y $\text{kg}_{\text{C}_2\text{H}_4}\cdot\text{kg}_{\text{fruto}}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.

Por otro parte, para expresar g_{CO_2} y $g_{\text{C}_2\text{H}_4}$ en $\text{mL}_{\text{CO}_2}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ y $\text{mL}_{\text{C}_2\text{H}_4}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ se consideraron las siguientes Ecuaciones (9) y (10):

$$g_{\text{CO}_2} = (y^f_{\text{CO}_2} - y^i_{\text{CO}_2}) \cdot V_L / m \cdot t_r \dots\dots\dots (9)$$

$$g_{\text{C}_2\text{H}_4} = (y^f_{\text{C}_2\text{H}_4} - y^i_{\text{C}_2\text{H}_4}) \cdot V_L / m \cdot t_r \dots\dots\dots (10)$$

En donde V_L se maneja en mL, m en kg, t_r en horas y las concentraciones ($y^f_{\text{CO}_2} - y^i_{\text{CO}_2}$) y ($y^f_{\text{C}_2\text{H}_4} - y^i_{\text{C}_2\text{H}_4}$) en fracción volumen.

Para obtener las muestras gaseosas y generar los datos de ($y^f_{\text{CO}_2} - y^i_{\text{CO}_2}$) y ($y^f_{\text{C}_2\text{H}_4} - y^i_{\text{C}_2\text{H}_4}$), se empleó la metodología en sistema cerrado estático propuesta por Mendoza-Wilson y Báez-Saduño (2000). En la cual, se colocó el fruto de ilama correspondiente dentro de una cámara, que corresponde a un recipiente plástico previamente ventilado, de paredes impermeables con capacidad de 2.4 L y puerto de monitoreo. Con el recipiente sellado herméticamente, el fruto se dejó en reposo una hora, después de lo cual se tomaron 4 mL de muestra gaseosa de la atmósfera interna del recipiente, para almacenarla en tubos de muestreo al vacío (Vacutainer®) donde permanecieron en refrigeración hasta el momento de su análisis instrumental. Al respecto, la metodología para la evaluación cuantitativa de las concentraciones de dióxido de carbono y etileno, correspondió a una rutina de análisis instrumental por cromatografía de gases, en un cromatógrafo de gases (Varian modelo 3400CX, USA) usando el software

Star Chromatography Workstation Versión 4.5., equipado con columna capilar Chrompack® tipo poraplot Q con capa porosa de sílica fundida (Plot) de 27.5 m de largo, 0.32 mm de diámetro interno y 0.45 mm de diámetro externo, con detector de conductividad térmica (TCD) para determinar CO₂ y detector de ionización de flama (FID) para etileno. El gas de arrastre fue helio, con presión en la cabeza de la columna de 29 a 30 psi, las condiciones de operación para el GC fueron; 150, 210, 250 y 80°C en inyector, TCD, FID y columna, respectivamente.

Para la valoración cuantitativa de las concentraciones de ambos gases, se auxilio con estándares de etileno y CO₂, ambos de grado cromatográfico (INFRA S.A. de C.V.). Se realizaron curvas tipo de concentraciones conocidas de etileno vs área bajo la curva de los picos cromatográficos generando por dichas concentraciones, y concentraciones conocidas de CO₂ vs área bajo la curva de los picos cromatográficos generados por las distintas concentraciones. Con la evaluación de las concentraciones de CO₂ y C₂H₄ en las muestras problema, empleando las curvas tipo, y el volumen libre del recipiente ($V_L = \text{Volumen del recipiente} - \text{Volumen del fruto}$), considerando la fracción volumen de $y_{CO_2}^i$ como 0.0003 (corresponde a la concentración atmosférica ambiente de 0.03%) y fracción volumen ($y_{C_2H_4}^i$) de etileno como cero, finalmente se aplicaron las Ecuaciones 9 y 10 para obtener los datos de tasa respiratoria y producción de etileno.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación del efecto de la intensidad de microperforado sobre las condiciones de operación de la atmósfera modificada

Para todas las presentaciones de microperforado, en ambas condiciones térmicas, las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono se modificaron con el paso del tiempo de monitoreo (figuras 14 y 15). Los sistemas se instalaron en las unidades experimentales de manera pasiva. Es decir, la modificación de las concentraciones de los gases en el envase, fue en primer término; el resultado del proceso respiratorio de los frutos de ilama, proceso metabólico que implica consumo de oxígeno y liberación de dióxido de carbono, permitiendo que sus concentraciones se modificaran de manera decreciente y creciente, respectivamente.

En la figura 14 se puede observar que el cambio en las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono, para el almacenamiento a 20°C, presenta cinéticas con una tendencia no lineal en ambos gases. Específicamente, con un comportamiento exponencial, tendencia que no se mostró con igual magnitud en el tratamiento D20 (película plástica con 20 microperforaciones), donde la cinética de modificación en las concentraciones de los gases (O_2 - CO_2) dentro del envase se mostró distinta a los otros tres tratamientos.

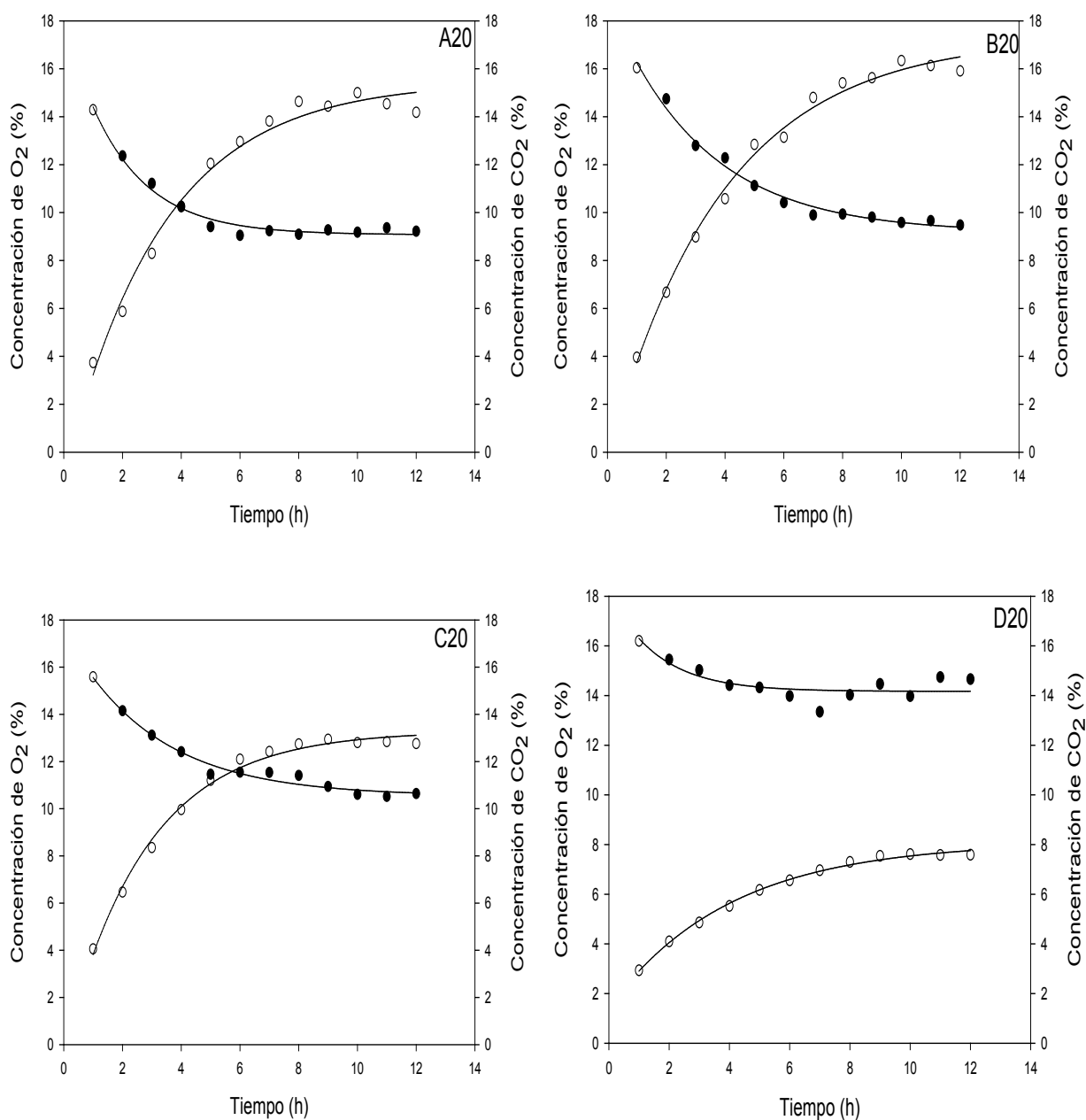


Figura 14. Cinéticas de cambio en la concentración de O₂ (●) y CO₂ (○) en los sistemas de atmósfera modificada, para el envasado de frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) con condición térmica de almacenamiento a 20°C, en película plástica de polietileno de baja densidad; (A) película plástica intacta, (B) película plástica con 5 microperforaciones, (C) película plástica con 10 microperforaciones y (D) película plástica con 20 microperforaciones. Los símbolos puntuales representan la media de tres repeticiones y la línea sólida corresponde al ajuste de los datos utilizando un procedimiento de regresión no lineal.

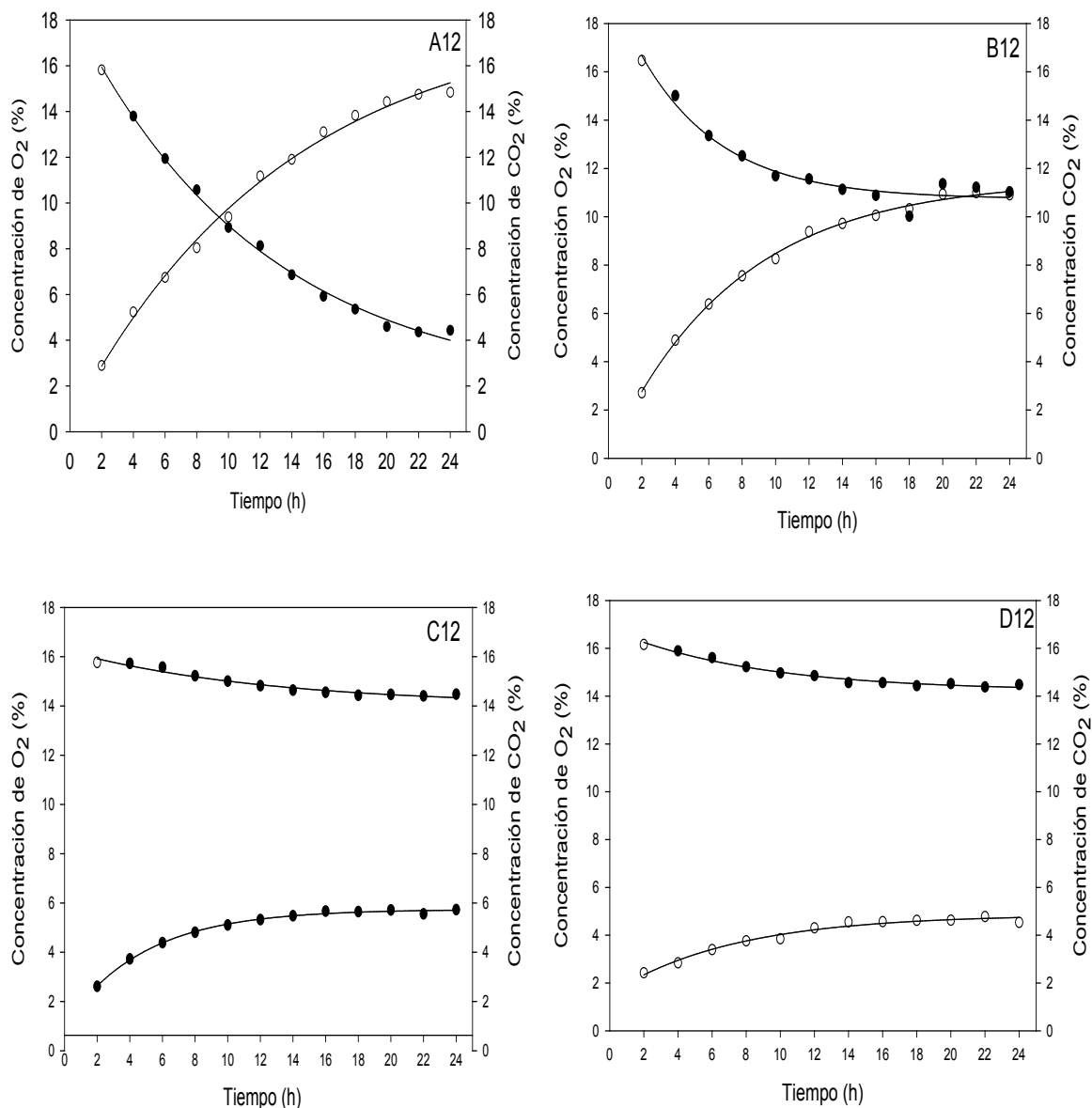


Figura 15. Cinéticas de cambio en la concentración de O₂ (●) y CO₂ (○) en los sistemas de atmósfera modificada, para el envasado de frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) con condición térmica de almacenamiento a 12°C, en película plástica de polietileno de baja densidad; (A) película plástica intacta, (B) película plástica con 5 microperforaciones, (C) película plástica con 10 microperforaciones y (D) película plástica con 20 microperforaciones. Los símbolos puntuales representan la media de tres repeticiones y la línea sólida corresponde al ajuste de los datos utilizando un procedimiento de regresión no lineal.

De igual manera, en los tratamientos a condición térmica de 12°C, se muestra una tendencia de cambio no lineal, en las concentraciones de los gases (O₂-CO₂). En general, reduciéndose el comportamiento exponencial a medida que se incrementa el número de perforaciones en las películas plásticas (figura 15) y estableciéndose en su lugar una tendencia lineal.

Por el comportamiento no lineal en las cinéticas, fue adecuado el manejo de los datos mediante la Ecuación 1. Los parámetros de ajuste al modelo se muestran en el cuadro 1, en donde, con base en el coeficiente de correlación “ R_o^2 ” se observa que las representaciones resultaron adecuadas al modelo.

Cuadro 1. Constantes de regresión no lineal asociadas al modelo $y = y_0 + a[1 - \exp(-bt)]$, para la representación matemática de la variación en las concentraciones de O₂ y CO₂ de los sistemas de AM para frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) a 12°C y 20°C, en el interior de bolsas de polietileno de baja densidad con diferente intensidad de microperforado.

Película plástica*	$y_{O_2}^o$ (%)	a_o (%)	b_o (h ⁻¹)	R_o^2	$y_{CO_2}^o$ (%)	a_c (%)	b_c (h ⁻¹)	R_c^2
<u>12°C</u>								
0	18.51	-16.78	0.08	0.99	0.40	17.86	0.07	0.99
5	19.68	-8.95	0.20	0.95	0.11	11.41	0.13	0.99
10	16.25	-2.23	0.08	0.96	1.04	4.69	0.20	0.99
20	16.79	-2.58	0.11	0.98	1.53	3.32	0.13	0.97
<u>20°C</u>								
0	18.07	-9.00	0.52	0.98	-1.08	16.54	0.30	0.98
5	18.87	-9.71	0.31	0.98	-0.21	17.53	0.25	0.99
10	17.52	-6.99	0.33	0.98	-0.30	13.58	0.36	0.99
20	18.14	-3.98	0.62	0.73	1.44	6.64	0.24	0.99

*Número de perforaciones en la película plástica de polietileno de baja densidad.

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5%, para determinar la significancia estadística del efecto de los factores

evaluados; condición térmica de almacenamiento, intensidad de microperforado y momento de muestreo, en sus distintos niveles de evaluación, y las interacciones entre dichos factores, de acuerdo con el diseño experimental en bloques completos al azar con arreglo factorial, se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Significancia estadística del análisis de varianza (ANOVA) para las concentraciones instaladas de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%), en sistemas de atmósfera modificada evaluados a 12°C y 20°C, con película plástica intacta, 5, 10 y 20 microperforaciones.

F.V	G.L	O ₂ (%)	CO ₂ (%)
Bloq	2	*	*
Tem	1	*	*
Per	3	*	*
Hor	5	*	*
Tem*Per	3	*	*
Tem*Hor	5	NS	NS
Per*Hor	15	*	NS
Tem*Per*Hor	15	NS	NS
C.V		9.21	31.97

F.V: Factor de variación; *: Significancia estadística con $p \leq 0.05$; NS: Diferencia estadística no significativa; C.V: Coeficiente de variación; G.L: Grados de libertad; Bloq: Bloque; Tem: Condición térmica de almacenamiento; Per: Intensidad de microperforado; Hor: Estación de muestreo; Tem*Per: Interacción entre el factor condición térmica de almacenamiento e intensidad de microperforado; Tem*Hor: Interacción entre el factor condición térmica de almacenamiento y estación de muestreo; Per*Hor: Interacción entre el factor intensidad de microperforado y estación de muestreo; Tem*Per*Hor: Interacción entre el factor condición térmica de almacenamiento, intensidad de microperforado y estación de muestreo; O₂(%): Concentración de oxígeno; CO₂(%): Concentración de dióxido de carbono.

Se encontró para las concentraciones instaladas de oxígeno y dióxido de carbono, dentro del envase, que los factores con efecto estadísticamente significativos corresponden al factor de bloqueo, condición térmica de almacenamiento, intensidad de microperforado y momento de muestreo, así como el efecto de la interacción doble entre el factor condición térmica de almacenamiento e intensidad de microperforado. En el almacenamiento de agallas de huitlacoche, con un sistema de atmósfera modificada empleando la propuesta del microperforado, en el análisis estadístico de los datos

experimentales con un $p \leq 0.05$ Monroy-Gutiérrez (2009) reporta para las concentraciones instaladas de O_2 (%) y CO_2 (%) en el ambiente inmediato al hongo, efecto significativo causado por los factores; temperatura, tipo de envase y tiempo de almacenamiento, así como en la interacción entre los factores temperatura y número de perforaciones.

Para el análisis del efecto por factor e interacciones entre ellos, que resultaron estadísticamente significativos, los cuadros 3, 4, 5 y 6 contienen los datos del proceso de comparación múltiple de medias para las concentraciones instaladas de O_2 (%) y CO_2 (%) dentro del envase plástico.

Cuadro 3. Efecto de la interacción doble entre los factores condición térmica de almacenamiento e intensidad de microperforado sobre la concentración instalada de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%) en sistemas de atmósfera modifica para el envasado de *Annona diversifolia* Saff.

		Factor envase (número de microperforaciones)							
Factor Temperatura		0		5		10		20	
Oxígeno (%)									
12 °C	C	11.52	B	13.42	A	15.36	A	15.44	
20 °C	D	9.84	D C	11.06	C	11.77	B A	14.40	
†DMS	1.51								
Dióxido de carbono (%)									
12 °C	B	7.24	C B	6.52	C B	4.33	C	3.43	
20 °C	A	12.15	A	13.00	A	11.14	C B	6.44	
†DMS	3.28								

[†]Letras mayúsculas iguales en sentido de columna e hilera, son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias Scheffe ($p \leq 0.05$). [†]DMS: Diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 4. Efecto del factor condición térmica de almacenamiento sobre la concentración instalada de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%) en sistemas de atmósfera modifica para el envasado de *Annona diversifolia* Saff.

Factor	Niveles		O ₂ (%)		CO ₂ (%)
Condición térmica de almacenamiento	12°C	A ^z	13.94	B	5.38
	20°C	B	11.77	A	10.68
[†] DMS			0.39		0.85

^zLetras mayúsculas iguales en sentido de columna, son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias Scheffe ($p \leq 0.05$). [†]DMS: Diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 5. Efecto del factor intensidad de microperforado sobre la concentración instalada de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%) en sistemas de atmósfera modifica para el envasado de *Annona diversifolia* Saff.

Factor	Niveles		O ₂ (%)		CO ₂ (%)
Intensidad de microperforado	Bolsa intacta	D	10.68	A	9.69
	5 microperforaciones	C	12.24	A	9.76
	10 microperforaciones	B	13.57	B	7.73
	20 microperforaciones	A ^z	14.92	C	4.93
[†] DMS			0.79		1.72

^zLetras mayúsculas iguales en sentido de columna, son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias Scheffe ($p \leq 0.05$). [†]DMS: Diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 6. Efecto del factor estación de muestreo sobre la concentración instalada de oxígeno (%) y dióxido de carbono (%) en sistemas de atmósfera modifica para el envasado de *Annona diversifolia* Saff.

Factor	Niveles		O ₂ (%)		CO ₂ (%)
Estación de muestreo	2 h	A	15.11	C	4.21
	4 h	B	13.71	B C	6.62
	6 h	C B	12.66	B A	8.20
	8 h	C	12.23	A	9.28
	10 h	C	11.73	A	9.80
	12 h	C	11.67	A	10.08
[†] DMS			1.16		2.52

^zLetras mayúsculas iguales en sentido de columna, son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias Scheffe ($p \leq 0.05$). [†]DMS: Diferencia mínima significativa honesta.

Con relación al efecto estadísticamente significativo del factor bloque, es completamente predecible al considerar que cada bloque correspondió de manera independiente a un fruto de ilama, que aunque cosechados aproximadamente a 85 DDF, provenían de distintos árboles de *Annona diversifolia* Saff., lo que significa que la heterogeneidad del material vegetal experimental si representó un factor de variación.

Por otro lado, en el análisis de la condición térmica de almacenamiento, considerando que las concentraciones instaladas $O_2(\%)$ y $CO_2(\%)$ resultaron estadísticamente significativas y en agrupaciones de medias distintas, en ambas temperaturas, hay que señalar que a $20^\circ C$ las concentraciones fueron menores para O_2 con 11.77% y mayores para CO_2 con 10.68%, en comparación con la condición de $12^\circ C$ con 13.94% de O_2 y 5.38% de CO_2 , indicando un metabolismo más lento a $12^\circ C$. En el almacenamiento de agallas de huitlacoche, Monroy-Gutiérrez (2009) encontró que a $3^\circ C$ la concentración de $O_2(\%)$ se instaló en un mayor valor que a $20^\circ C$. En el caso del $CO_2(\%)$, la situación fue inversa y los valores mayores resultaron en la temperatura más alta ($20^\circ C$).

De acuerdo con Tano *et al.* (1999) la creación y mantenimiento de una mezcla gaseosa óptima en un almacenamiento con AM depende de la velocidad de respiración del producto y permeabilidad de la película al oxígeno y dióxido de carbono, los cuales son afectados directamente por la temperatura. En este sentido, Fonseca *et al.* (2002) señalan que la temperatura es considerada el factor externo que afecta de manera más importante la actividad respiratoria,

En relación a la temperatura, el comportamiento que muestran los frutos de ilama, sugiere que son sensibles a las condiciones ambientales de la atmósfera circundante, y de manera favorable una temperatura baja, lo que implica que temperaturas de refrigeración resultarían útil para reducir la actividad metabólica y como resultado una mayor vida de anaquel en los frutos de ilama.

El efecto de la intensidad de perforado fue distinto en las dos temperaturas evaluadas (20°C y 12°C), y por ello el análisis de varianza reportó efecto estadísticamente significativo ($p \leq 0.05$) para la interacción de los factores; temperatura de almacenamiento e intensidad de microperforado (cuadro 3). Para el oxígeno y dióxido de carbono, la temperatura afectó en forma significativa ($p \leq 0.05$) las concentraciones instaladas para todos los niveles de perforado. Este comportamiento coincide con lo señalado por Renault *et al.* (1994) respecto a que el equilibrio en las concentraciones instaladas de O₂ y CO₂, es dependiente del número de perforaciones y la temperatura, y de acuerdo con estos autores, también afecta el diámetro de las perforaciones y el espesor de la película.

Además, el tiempo en el cual se estableció el equilibrio de la atmósfera, considerando la temperatura y tipo de perforación, se observan en las figuras 14 y 15. Para la condición de 20°C y 12 horas de monitoreo; en la bolsa intacta, el oxígeno se estabilizó a las 5 h de envasado el fruto, llegando a niveles de 9.2%, sin agotarse completamente al final del periodo de monitoreo, quedando en la misma concentración (9.2% O₂), mientras que el dióxido de carbono lo hizo a las 7 h con 14.4% y finalmente llegó a 14.2%. Los envases con 5

microperforaciones presentaron 9.7% O₂ en 7 h y 15.9% CO₂ en 8 h, y al finalizar el monitoreo 9.5% O₂-15.9% CO₂. Para el sistema con 10 microperforaciones, los tiempos fueron de 5 y 6 horas con 11.5% O₂ y 12.1% CO₂, llegando finalmente a 10.6% O₂-12.8% CO₂. Por otro lado, para la condición de 20 microperforaciones la atmósfera se estableció en 14.4% O₂-7% CO₂, después de 4 y 7 h, y por último en 14.7% O₂-7.6% CO₂.

En ninguna de las condiciones de microperforado, el oxígeno se agotó completamente, y el dióxido de carbono se establecieron en niveles alrededor de 15%. Cabe señalar que aun cuando para ilama no se cuenta con información referente a los niveles críticos en las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono, comparando los datos obtenidos con productos de elevada tasa respiratoria, igual que la ilama, por ejemplo para setas Cliffe-Byrnes y O'Beirne (2007), señalaron que pueden usarse valores mínimos de 1% de O₂ y máximo 15% para CO₂.

Por lo anterior, el esquema de envases microperforados, constituyen una alternativa de envasado, ya que al no agotarse completamente el oxígeno, contribuiría en el control de un determinado metabolismo fermentativo en los frutos, situación contraría en la que la falta de O₂ activaría dicho metabolismo. Sin embargo, el tiempo que se monitorearon los sistemas, podría resultar muy breve para indicar que no se presentara un metabolismo fermentativo. En un sistema de AM con película plástica intacta para frutos de ilama, Ruíz-Sánchez (2007) reportó que a 20°C el oxígeno se agotó en los primeros dos días de

almacenamiento pasando de una condición de atmosfera normal (20.95%) a 1%, y el dióxido de carbono pasó de 0.03% a 5-10%.

Por otro lado, a 12°C las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en la atmósfera circundante al fruto dentro del envase, considerando el tipo de perforación, y 12 horas de monitoreo, fueron las siguientes; en bolsa intacta de 8.1% O₂-11.2% CO₂, menores a las registradas en el mismo sistema a 20°C (9.2% O₂-14.2% CO₂), con 5 microperforaciones el balance fue 11.6% O₂-9.4% CO₂, mayor y menor respectivamente a las registradas en el mismo sistema a 20°C (9.5% O₂-15.9% CO₂), en 10 microperforaciones se obtuvo 14.8% O₂-5.3% CO₂, mayor y menor a las registradas a 20°C (10.6% O₂-12.8% CO₂), y para 20 microperforaciones 14.9% O₂-4.3% CO₂, mayor y menor a las registradas en el mismo sistema a 20°C (14.7% O₂-7.6% CO₂).

Está documentado que durante la instalación de una AM se desarrollan dos tipos de interacciones; una entre el interior del tejido vegetal y el ambiente dentro del envase, y la otra entre este último y el ambiente externo, y cuando se igualan las velocidades de consumo de O₂ y producción de CO₂ dentro del envase y estas se hacen constantes, se reconoce esta situación como una condición de régimen estacionario (Cameron *et al.*, 1995; Rodríguez-Félix *et al.*, 2005).

En esta situación en la que las concentraciones instaladas de O₂(%) resultaron similares a la concentración atmosférica ambiental, sería conveniente limitar la permeabilidad de la película plástica a este gas. En este caso, para el manejo

de la permeabilidad de polietileno de baja densidad (PBD), mediante un análisis de balance de materiales Ruiz-Sánchez (2007) encontró que con 15 μm espesor, la concentración de O_2 se fija en 2.31 kPa (2.96% O_2), y considera éste como un nivel adecuado para evitar condiciones de anaerobiosis, en sistemas de almacenamiento con AM de frutos de ilama con PBD.

Además, de la valoración del espesor adecuado es necesario determinar el punto de compensación anaeróbica para la ilama, que permitiría precisar la recomendación para el almacenamiento del fruto, para conseguir un mayor abatimiento del O_2 , reducir más la actividad fisiológica y maximizar su vida útil, lo cual constituye el objetivo de implementar el sistema de AM.

De acuerdo con Cameron *et al.* (1995) y Raj y Paul (2007) el polietileno de baja densidad exhibe una permeabilidad a CO_2 mayor que a O_2 , debido a esto se cree que la película plástica permitió mayor intercambio de CO_2 que de O_2 a través de sus paredes y por tal razón, el comportamiento de bolsa intacta y bolsa perforada resultó semejante para CO_2 .

Para 20°C resulta mejor la bolsa con 10 μP , donde los gases se instalaron en 10.6% O_2 -12.8% CO_2 , aun cuando se reduce el O_2 y aumenta el CO_2 , el primero se redujo menos que en los dos primeros niveles de microperforado (sin μP y 5 μP) y el CO_2 fue menor en los mismos tratamientos. A 12°C el envase con 5 μP sería el recomendado, debido a que con el envase intacto el O_2 se agotó rápidamente acumulándose el CO_2 , mientras que con 10 μP y 20 μP el O_2 y CO_2 ligeramente se modificaron con relación a las concentraciones al

inicio del monitoreo, lo que podría relacionarse con que el plástico no restringió lo suficiente el intercambio de gases de la atmósfera externa hacia el interior del envase y viceversa. En general, sería útil emplear a mayor temperatura mayor número de microperforaciones. Situaciones relacionadas fueron reportadas por Monroy-Gutiérrez (2009) al recomendar para 20°C el uso de bolsa con 5 μ P y para 3°C bolsa sin microperforaciones.

4.2 Caracterización física y metabólica de ilama

4.2.1 Caracterización inicial de los frutos de ilama

Son pocos los trabajos que reportan información sobre las principales características físicas de los frutos de ilama, caracterización que resulta de particular importancia debido a la gran heterogeneidad que presenta dicho material vegetal. En la literatura a pesar de que existe información del análisis proximal de la pulpa del fruto de *Annona diversifolia*, los autores no especifican la variedad estudiada (Duke *et al.*, 1993; Cruz-Estrada *et al.*, 2000).

Para la caracterización de los frutos de ilama, en el trabajo que nos ocupa, hay que considerar que se manejaron frutos cosechados con 85 DDF, etapa de desarrollo de los frutos en la que la mayoría de las características físicas ya se han expresado (Moreno-Velázquez *et al.*, 2008), resultando destacados la masa individual y con ello el volumen, en comparación con otros frutos que se comercializan en estado fresco, situación que es necesario tomar en cuenta para la comercialización de la ilama en sistema de envase plástico, sobre todo en la elección del envase a emplear.

Para la caracterización de la muestra de frutos de *Annona diversifolia*, en primer lugar, estos registraron en su masa valores promedio de 256.2 g con un mínimo de 153.1 g y máximo de 313.3 g, resultando menores que los datos reportados por Cruz-Estrada *et al.* (2000) de 739 g y Julián-Loaeza (2009) con variación de 686 a 757.2 g. Aunque cabe mencionar que en ambos trabajos los autores no proporcionan información sobre el color de pulpa, la variedad y la zona de producción de donde se obtuvo la ilama. Para la zona del Estado de México, Ruíz-Sánchez (2007) reporta valores promedio de 566.6 g en fruta de pulpa rosa. Por otro lado, Moreno-Velázquez *et al.* (2008) señalan que los frutos de ilama de pulpa blanca y rosa presentan un patrón de crecimiento doble sigmoide con duración de 99 días después de floración (DDF), incluyendo la primera etapa de maduración del fruto. En donde, la primera fase de desarrollo, es caracterizada por un rápido crecimiento, en la cual el fruto alcanza el 74 y 76% de su peso total correspondiendo para los frutos de pulpa blanca 336.6 g y 402.7 g para los de pulpa rosa, datos que aun cuando corresponden a material vegetal de la misma zona de producción, en el estado de Guerrero, de donde se obtuvo en esta ocasión el material vegetal, siguen siendo mayores a los aquí obtenidos.

Con relación a la morfología de los frutos, en general *Annona diversifolia* se mostró ovoide, con la base hundida y los carpelos sobresalientes. Al respecto Julián-Loaeza (2009) indica que a simple vista estos frutos no son completamente esféricos, característica que junto con la masa y el volumen del fruto, también resulta importante considerar en la elección de los sistemas de envasado, parámetro que en este caso se evaluó con valores promedio de

291.9 cm³, mínimo de 174.4 cm³ y máximo de 357 cm³, datos que también resultan menores de los reportados por Ruíz-Sánchez (2007) con promedio de 645.5 cm³ y hasta 1050.1 cm³.

Con los datos obtenidos y los reportados en la literatura, en general para la morfología de *Annona diversifolia*, resulta evidente que se trata de frutos grandes, y de manera coherente con esto Salunkhe *et al.* (2000) con relación al peso total de frutos de ilama, encontraron que la mayor parte del fruto es pulpa con 52.9% hasta 60.7%, situación que explica porque los frutos de ilama se clasifican como frutos carnosos, compuestos por múltiples bayas fusionadas asociadas a brácteas. Sin embargo, resulta también importante el porcentaje que en conjunto representa la cáscara y semillas, con 25.8 hasta 36.8% y 10 hasta 12.5%, respectivamente.

En general, los consumidores de frutos de ilama en México, conocen tres variedades de *A. diversifolia*, y las diferencian principalmente por el color de la pulpa, que de acuerdo con Julián-Loaeza (2009) son de pulpa blanca, rosa y rosa mexicano. De esta manera, para desarrollar el presente trabajo, durante la cosecha del material vegetal, se seleccionaron frutos de pulpa rosa, propiedad física que fue evaluada instrumentalmente en escala CIEL*a*b. En los cuales, la luminosidad descrita por el parámetro L*, generó valores de 62.9%, y en algunos frutos de pulpa blanca, que resultaron dentro de la muestra se cuantifico el parámetro L* con valor de 85.7%, lo que resulta coherente con la escala de luminosidad, valores más cercanos al 100% serán los más claros. Sin embargo, los resultados numéricos que resultan son distintos a los reportados por Julián-Loaeza (2009) para frutos de pulpa blanca, rosa y rosa mexicana,

donde la variedad de pulpa blanca también fue la que presentó una mayor luminosidad con el valor más alto de L^* con solo 65.14, seguida de la variedad rosa con un valor de L^* de 58.12 y la rosa mexicano tuvo el menor valor con 47.36. Por otro lado, con respecto a los parámetros de a^* y b^* la variedad blanca se ubicó dentro de los colores amarillos teniendo los valores más altos y positivos de b^* con 17.78 y a^* con -0.47 , mientras que la variedad rosa se ubicó en la zona de los colores rojos con valores positivos de a^* y b^* de 7.46 y 6.15, respectivamente.

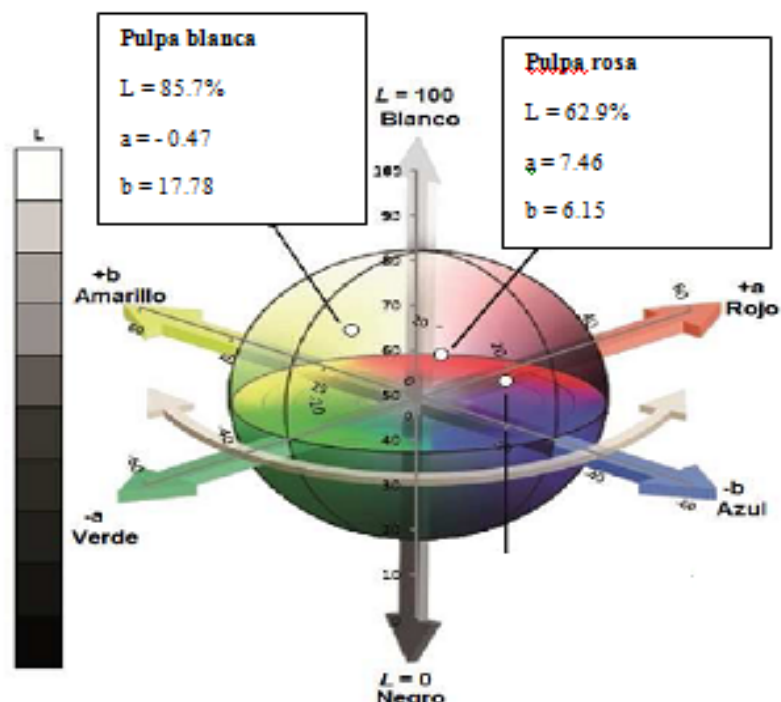


Figura 16. Distribución del espacio de color en escala CIE $L^*a^*b^*$ de los frutos de *Annona diversifolia* Saff.

Para concluir la valoración del color de la pulpa de los frutos de ilama, con relación al cálculo del ángulo de tono o matiz (Hue) y la cromaticidad o saturación (Chroma), donde los valores de Hue definirán el color propiamente dicho de la pulpa y la cromaticidad la pureza del mismo. La evaluación de los

frutos de ilama de pulpa blanca, los ubica en el plano tridimensional de la escala de color dentro de la zona amarilla con un valor Hue de 88.48°, y los frutos de pulpa rosa entre los tonos amarillos y rojos con un valor de Hue de 39.52°. Por otra parte, la cromaticidad de la pulpa blanca presentó un valor de 17.79, mientras que la rosa tuvo un valor menor con 9.67, asociando esto a que en la pureza de color la ilama blanca se percibe con color más intenso que la fruta rosa.

Con relación al color, en algunos productos hortofrutícolas, resulta importante indicar como los compuestos fenólicos además de contribuir con atributos de aroma y sabor, proporcionan características de amargura y acidez en algunos otros, también en numerosos productos alimenticios de origen vegetal o animal, influyen directamente en su color. Además, estos compuestos resultan de gran importancia por la actividad biológica que presentan como; agentes antimicrobianos, antivirales, antiinflamatorios, antitumorales, anticancerígenos y antioxidantes principalmente (Lule *et al.*, 2005). Solo algunos fenoles son considerados con importancia en alimentos, como los flavonoides, pigmentos producto del metabolismo de las plantas, concentrados principalmente en frutos, vegetales, semillas y flores. Roesler *et al.* (2007) reportan la presencia de ácido cafeico y catequina, compuestos derivados de fenoles, en frutos de *Annona crassiflora*.

Por otro lado, se encontraron valores de firmeza de 5.43 N evaluados en pulpa, Otero-Sánchez *et al.*, (2006) reportan para esta misma variable en frutos de ilama del trópico seco de Guerrero datos de 252 g·cm², señalando que el manejo del cultivo con podas, incrementó la firmeza de los frutos, pero afectó el

rendimiento de fruto en general. De manera comparativa, considerando que un fruto de aguacate 'Hass' presenta a la cosecha firmeza de pulpa superior a los 30 N y en madurez de consumo esta variable varía entre 1 y 5 N (Valle-Guadarrama *et al.*, 2002), podríamos señalar que los frutos de ilama presentan una firmeza baja, manifestando los cambios metabólicos que los frutos sufren como parte normal de su proceso de maduración. Para el contenido de sólidos solubles totales, Otero-Sánchez *et al.* (2006) indican 25.3°Brix en frutos con peso de 460 g. En este caso, los datos obtenidos en la pulpa de la fruta, para °Brix y acidez titulable fueron de 18.34 y 0.35% (Ac. Cítrico), respectivamente. Moreno-Velázquez (2008) indica para ilama que la mayor acumulación de sólidos solubles totales expresados como °Brix se presenta durante la última etapa de crecimiento que comprende de 79 a 99 DDF, acumulándose en los frutos de pulpa blanca a partir de 78 DDF, mientras que en los de pulpa rosa a los 85 DDF, alcanzando a la cosecha (99 DDF) valores para los frutos de pulpa blanca y rosa de 13 y 14.8°Brix. En cuanto al contenido de azúcares totales, se obtuvieron valores de 11.6% en pulpa, Moreno-Velázquez (2008) reporta datos para ilama de pulpa blanca y rosa de 12.6 y 12.8% en azúcares totales, al momento de la cosecha con 99 DDF, y Julián-Loaeza (2009) en el análisis proximal de frutos de *Annona diversifolia* Saff., 12.28, 17.68 y 14.87 g/100 g de pulpa fresca para pulpa rosa, rosa mexicano y blanca, respectivamente.

4.2.2 Pérdida de peso, tasa respiratoria y producción de etileno

El peso de los frutos, evaluado bajo las condiciones de maduración a temperatura de 20°C y H.R de 60-70% fue disminuyendo conforme el tiempo de

evaluación transcurrió (15 días), llegando a perder el 6% de peso en tan solo 5 días, 11% en 10 días y 16% en 15 días, lo cual resulta de gran importancia, ya que la pérdida de agua es la causa principal del deterioro en este tipo de productos frescos, debido a que no solo resulta en la pérdida cuantitativa de peso con implicaciones al mismo tiempo en la reducción de su valor económico, también lo es en la textura y valor nutricional (Kader, 1992). En la pérdida de agua, la señal inicial es el arrugamiento de la piel o cáscara, lo cual se presentó en los frutos de ilama monitoreados. Nakasone y Paull (1998) mencionan que en otros frutos, además sucede la decoloración de la cáscara. La figura 17 muestra la evolución en la pérdida de peso de los frutos de ilama, durante el periodo de monitoreo, indicando que con forme transcurrieron los días de almacenamiento, la reducción en el peso de las unidades experimentales, con respecto al inicial evoluciona, sin llegar a un valor constante.

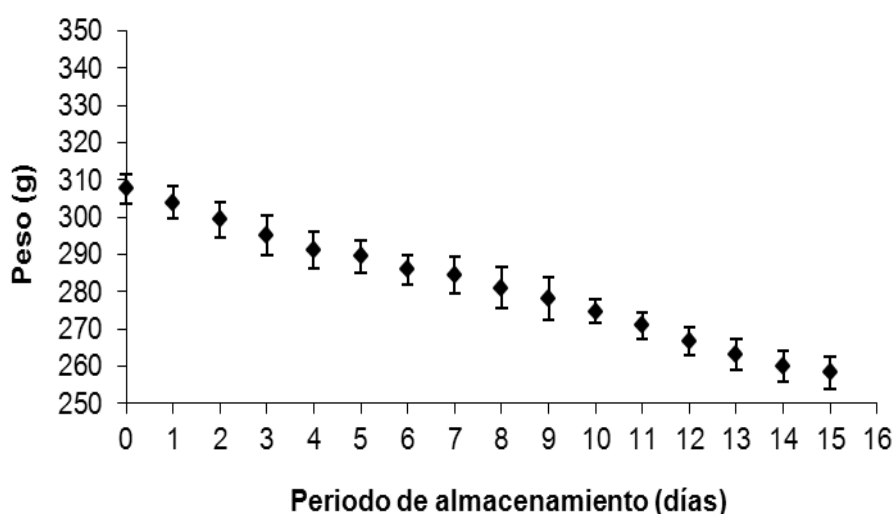


Figura 17. Cinética de la pérdida de peso fresco (g) en frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) almacenados en aire normal a 20°C. Los puntos graficados indican valores promedio de 5 repeticiones y las barras señalan la desviación estándar correspondiente.

Ruíz-Sánchez (2007) con respecto a frutos de ilama, menciona una pérdida de peso de 10.7% después de 10 días de almacenamiento en condiciones ambientales normales (20°C y H.R de 60-70%) para el estado de México. Además, reporta que el manejo de los frutos en atmósfera modificada con película plástica propició una reducción significativa (5%) en la pérdida de peso con solo el 0.93%, comportamiento que Ventura-Aguilar *et al.* (2011) también mencionan para el caso de mínimos procesados de hongo seta, almacenado con película plástica, con una pérdida en peso de aproximadamente 1%, mientras que en setas almacenadas sin cubierta plástica se observó hasta 60% de pérdida en peso, asociando esta elevada cifra al alto contenido de agua de los hongos y al incremento en el área superficial de los mismos, que se genera al rebanar el producto para obtener la presentación del mínimo procesado, induciendo con ello mayor susceptibilidad a la deshidratación (Villaescusa y Gil, 2003). Por otro lado, de acuerdo con Martínez-Flores *et al.* (2008), el huitlacoche con tratamiento de aire normal a 20°C alcanzó el 50% de pérdida de peso a los 12 días, en tanto que cuando el manejo del producto fue a 3°C la misma pérdida se obtuvo en 20 días. En general, Villaescusa y Gil (2003) reportan que es común que en muchos productos ocurran pérdidas entre 3 y 6% de peso fresco, y al igual que ocurre con una gran diversidad de ellos, la pérdida es principalmente causada por la transpiración de agua, y la velocidad a la que esto ocurre se afecta por la temperatura y humedad relativa del ambiente (Simón *et al.*, 2005).

Considerando el patrón de crecimiento doble sigmoide con un periodo total de desarrollo de 99 días después de floración (DDF) que reporta Moreno-Velázquez (2008) para frutos de ilama, en los que el peso se incrementó a partir de la apertura de flores y hasta la madurez de cosecha (agrietamiento de la cáscara) a 99 DDF, tanto para los de pulpa blanca como para los de pulpa rosa, alcanzando estos últimos un promedio de 306.6 g a los 57 DDF para posteriormente obtener un peso promedio de 402.7 g. En este caso, se observa que en la conclusión de la etapa de maduración, los frutos de ilama cosechados a 85 DDF, y mantenidos bajo condiciones ambientales normales (20°C y H.R de 60-70%) pierden peso más rápidamente de lo que lo ganan. En este sentido, Kader (2002) indica que la velocidad de deterioro de los productos hortofrutícolas después de cosechados, está asociada con el manejo que reciben y con las condiciones de almacenamiento, transporte y mercadeo. Siendo en el almacenamiento; la temperatura y la humedad relativa, considerados los factores físicos de mayor importancia que afectan la vida poscosecha de los productos hortícolas (Ryall y Lipton, 1982).

Para el caso que nos ocupa, el análisis de varianza con el diseño experimental completamente al azar de los datos obtenidos para estudiar el efecto del factor días de almacenamiento sobre el peso de los frutos almacenados durante 15 días a 20°C, presenta diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$), para los distintos días de monitoreo. Además, con el procedimiento de comparación múltiple de medias (cuadro 7) para los pesos de las unidades experimentales en los distintos días de almacenamiento, se observa que desde el primer día de

monitoreo los frutos registraron pérdida de peso, respecto a su peso inicial, y a partir del cuarto día el peso de los mismos, los ubicó en un grupo estadísticamente distinto ($p \leq 0.05$) con relación al peso promedio inicial (307.6 g) registrado.

Cuadro 7. Efecto del factor días de almacenamiento sobre el peso (g) de frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) almacenados durante 15 días a 20°C.

Factor	Niveles				
Tiempo de almacenamiento (días)	1	2	3	4	5
	303.8ab	299.3abc	295.1abcd	291.1bcde	289.5bcde
	6	7	8	9	10
	285.9cdef	284.6cdefg	281.0defgh	278.1efgh	274.6fghi
	11	12	13	14	15
	270.8ghij	266.8hij	263.1ij	259.9ij	258.2j
[†] DMS	14.773				

^zLetras minúsculas iguales en sentido de fila y columna, son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias Scheffe ($p \leq 0.05$). [†]DMS: Diferencia mínima significativa honesta.

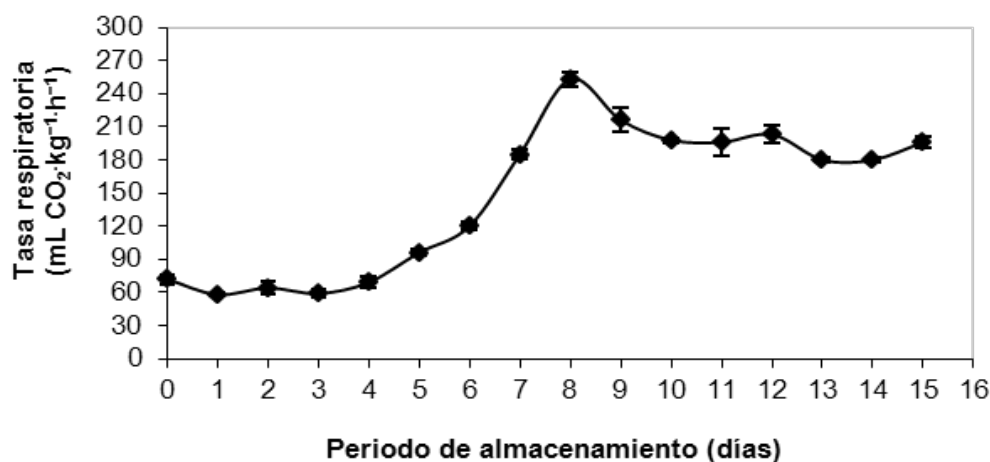


Figura 18. Cinética de la tasa respiratoria (expresada como producción de CO₂) de frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) cosechados con 85 DDF y almacenados en atmósfera normal a 20°C. Los puntos graficados indican valores promedio de 5 repeticiones y las barras señalan la desviación estándar correspondiente.

Como parte de la evaluación del metabolismo poscosecha de los frutos de ilama, la figura 18 muestra la cinética de cambio en la tasa respiratoria de los frutos, en términos de producción de CO_2 , donde se observa que este parámetro, durante el periodo de almacenamiento de los frutos, fluctuó entre 58 y 253 $\text{mL de CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$.

En este caso, tratándose de frutos cosechados con 85 días después de floración, presentaron su pico de máxima tasa respiratoria a los 9 días después de su cosecha y 8 de almacenamiento, alcanzando en este punto un valor de 253 $\text{mL de CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, semejante al reportado en otras anonáceas, entre ellas; la anona con 250 $\text{mg de CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ a los 5 días poscosecha y chirimoya con 230 $\text{mg de CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ a los 3 días (Alique y Zamorano, 2000; Vishnu, 2000).

Con base en la velocidad de respiración Nakasone y Paull (1998) clasifican a la guanábana dentro de la clase muy alta con valores superiores a 300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ y a la anona en la clase alta con valores de 150 a 300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. Tomando como referencia esta clasificación, y los resultados obtenidos para ilama, el fruto estaría en la clase alta, y explicaría porque la alta perecibilidad del fruto.

De acuerdo con Kader (1992) la velocidad de respiración, es un indicativo proporcional de la velocidad de deterioro de los vegetales. Wills *et al.* (1984) indican que la respiración de los productos hortofrutícolas aumenta en función de la temperatura, y al incrementarse ésta, se presentan en un menor tiempo los valores máximos de la tasa respiratoria. Por ejemplo, Ventura-Aguilar *et al.* (2011) reportan para hongo seta, en presentación de mínimo procesado,

almacenado a 17°C su valor máximo de respiración en el día 3, mientras que las setas almacenadas a 5°C y 2°C en 5 y 13 días, respectivamente.

Antes de la cosecha, en la valoración de la intensidad respiratoria, expresada como producción de CO₂, para frutos de ilama Moreno-Velázquez *et al.* (2008) encontraron que este parámetro indicador del metabolismo del fruto, descendió durante una primera etapa de los 15 a 57 DDF desde 129.7 y 272.9 hasta 103.8 y 94.09 mL de CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ en frutos con pulpa blanca y rosa, respectivamente. En una segunda etapa de 58 a 78 DDF se presentó un aumento hasta 117.6 y 127.7 mL de CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ en los mismos tipos de pulpa y en una tercera etapa de 79 a 99 DDF los valores no se modificaron significativamente. Por otro lado, Ruíz-Sánchez (2007) indica en promedio 94.8 mL de CO₂·kg⁻¹·h⁻¹, para frutos en los que la madurez de las ilamas correspondió a un estado postclimaterio, confirmado al no registrarse durante el periodo de evaluación la característica elevación en la tasa respiratoria correspondiente a la etapa de máximo climaterio.

Además, con respecto a la tasa respiratoria de ilama Ruiz-Sánchez (2007) indica que el comportamiento en el transcurso del tiempo postcosecha evaluado, fue la reducción en el consumo de O₂ y producción de CO₂, sugiriendo que los frutos fueron sensibles a la composición de la atmósfera circundante. Es decir, que la aplicación de sistemas de atmósfera modificada (AM), bajo los cuales reporta sus resultados, presenta posibilidades de ser útil para disminuir la actividad metabólica de los frutos, y con ello conseguir un alargamiento de su vida de anaquel. Al respecto, Cantwell (2002) reporta que en algunos productos como la papa y el melón la aplicación de esta tecnología

no tiene efecto benéfico, y la razón de ello es que la tasa de consumo de O₂ y producción de CO₂ no se afecta por la presencia ambiental de CO₂ o la disponibilidad de O₂. Además, considerando los parámetros de permeancia y permeabilidad de la película plástica de polietileno de baja densidad empleado, y considerando que el punto de compensación anaeróbica se ubica alrededor de 2% de O₂ (Valle-Guadarrama *et al.*, 2004) para muchos productos hortofrutícolas, Ruíz-Sánchez (2007) obtuvo mediante estimación matemática un espesor requerido para la película plástica de 15 micrómetros.

Cuadro 8. Efecto del factor días de almacenamiento sobre la intensidad respiratoria (mL de CO₂:kg⁻¹.h⁻¹) de frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) almacenados durante 15 días a 20°C.

Factor	Niveles				
Tiempo de almacenamiento (días)	1	2	3	4	5
	58g	64g	59g	69g	96f
	6	7	8	9	10
	120e	185cd	253a	216b	198cbd
	11	12	13	14	15
	196cd	203cb	180d	180d	196cd
[†] DMS	19.129				

^zLetras minúsculas iguales en sentido de fila y columna, son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias Scheffe ($p \leq 0.05$). [†]DMS: Diferencia mínima significativa honesta.

El análisis de varianza de los datos obtenidos para estudiar el efecto del factor; días de almacenamiento sobre la tasa respiratoria de los frutos almacenados durante 15 días a 20°C, presenta diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$), para los distintos días de monitoreo. Además, con el procedimiento de

comparación múltiple de medias (cuadro 8) para la tasa respiratoria de las unidades experimentales, en los distintos días de almacenamiento, se observa que en los cuatro primeros días de monitoreo, los frutos reportaron bajas tasas de actividad respiratoria, más o menos constantes, y fue a partir del quinto día que estos presentaron, en este parámetro metabólico, diferencia estadística significativa, ubicando para dicho día la tasa respiratoria de la ilama en una agrupación de medias distinta, para continuar incrementando en el sexto y séptimo día, y alcanzar el pico de máxima tasa respiratoria en el octavo día de almacenamiento y noveno después de la cosecha con $253 \text{ mL de CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Por otro lado, en la figura 19 se presenta la cinética de cambio en la producción de etileno, con relación al tiempo de almacenamiento transcurrido. De donde se destaca que la presencia de dicho gas, no se detectó desde el inicio del periodo de almacenamiento, y el incremento en su concentración fue a partir del día siete después de la cosecha, presentándose el pico climatérico en el día 10 después de la cosecha y 9 de almacenamiento con $1126 \text{ } \mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Al identificarse el pico climatérico en la producción de etileno, se confirma lo señalado por Nakasone y Paull (1998) quien menciona que todas las anonáceas son consideradas frutos climatéricos. En este sentido, por la producción de etileno Kader (1992) clasifica a la chirimoya en la clase muy alta con valores superiores a $100 \text{ } \mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, mientras que Nakasone y Paull (1998) ubican a la anona en la clase moderada con valores de 1 a $10 \text{ } \mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, y a la chirimoya y guanábana en la muy alta con producción superior a $100 \text{ } \mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. En específico en la evaluación de ilama Moreno-Velázquez *et al.* (2008) indican que uno de los cambios fisiológicos más importantes fue el incremento

significativo de etileno en fruta cosechada con 99 días después de floración, relacionándose con la acumulación de azúcares y agrietamiento de fruta. La producción de este gas se detectó hasta el momento de la cosecha con 227.3 y 83.20 μL de $\text{C}_2\text{H}_4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ en fruta de pulpa blanca y rosa respectivamente, etapa que coincidió con la máxima acumulación de azúcares (totales y reductores) y sólidos solubles totales, sugiriendo la activación de enzimas hidrolíticas por la acción de etileno, favoreciendo de esta manera la degradación de compuestos de reserva (Hubbard *et al.*, 1990), mientras que para fruta de ambos tipos de pulpa, cosechada a los 85 DDF el aumento en el contenido de azúcares totales, reductores y °Brix indicó el inicio del proceso de maduración.

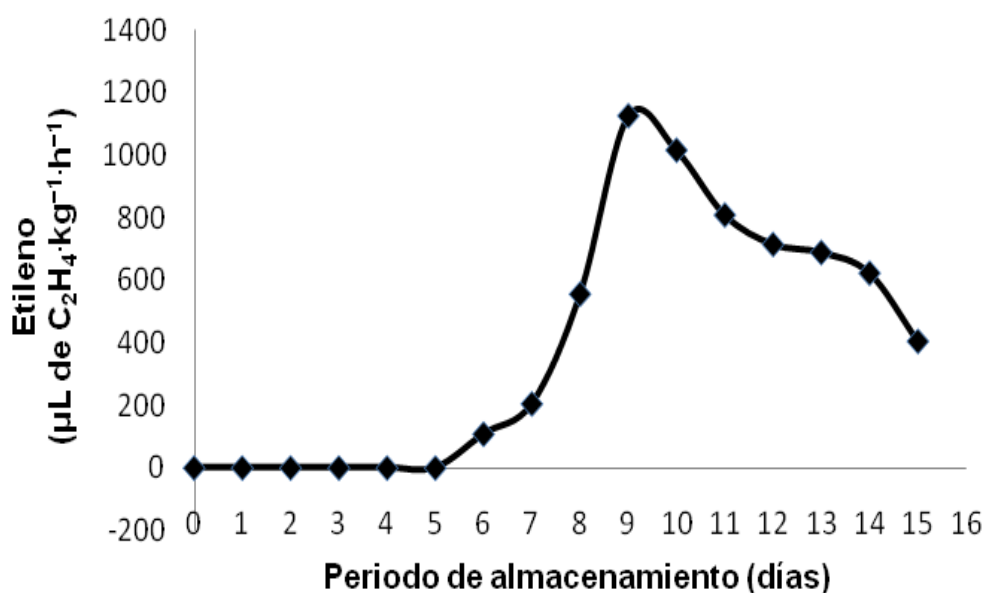


Figura 19. Cinética de producción de etileno en frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) cosechados con 85 DDF y almacenados en atmósfera normal a 20°C. Los puntos graficados indican valores promedio de 5 repeticiones y las barras señalan la desviación estándar correspondiente.

Cuadro 9. Efecto del factor días de almacenamiento sobre la producción de etileno ($\mu\text{L de C}_2\text{H}_4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) en frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) almacenados durante 15 días a 20°C.

Factor	Niveles				
Tiempo de almacenamiento (días)	6	7	8	9	10
	108j	205i	556g	1126a	1016b
	11	12	13	14	15
	809c	715d	689e	623f	405h
[†] DMS	17.287				

^zLetras minúsculas iguales en sentido de fila y columna, son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias Scheffe ($p \leq 0.05$). [†]DMS: Diferencia mínima significativa honesta.

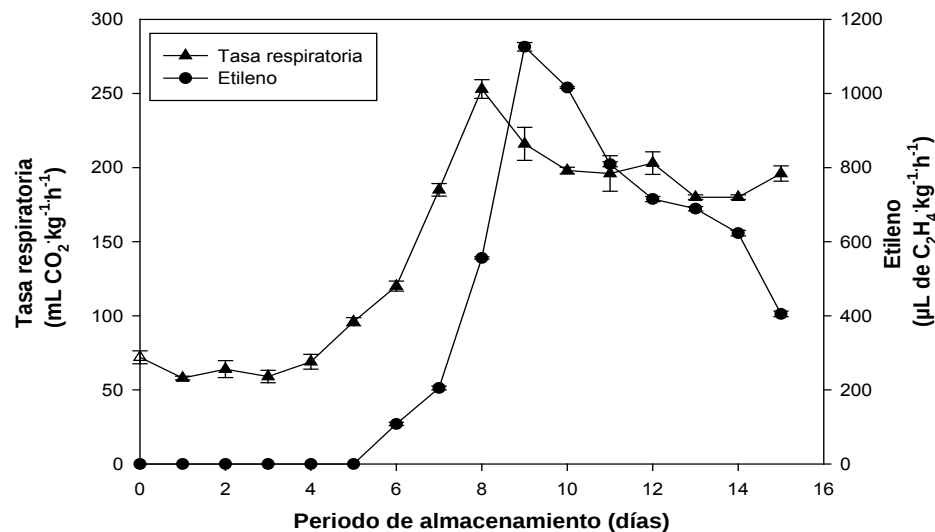


Figura 20. Cinética de la tasa respiratoria y de producción de etileno en frutos de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) cosechados con 85 DDF y almacenados en atmósfera normal a 20°C. Los puntos graficados indican valores promedio de 5 repeticiones y las barras señalan la desviación estándar correspondiente.

Por su parte, Nakasone y Paull (1998) en atemoya mencionan que la respiración alcanza su máximo valor alrededor de tres días después de cosechado el fruto y la etapa comestible en los siguientes dos días. Mientras

tanto, en guanábana la producción de etileno inicia aproximadamente a 48 horas después de iniciado el pico respiratorio, y alcanza su máximo climaterio simultáneamente con este, con un tiempo de almacenamiento máximo de seis a siete días (Paull, 1983).

En este caso, tratándose de frutos de ilama de pulpa rosa cosechados con 85 DDF y manejados 20°C, y comparar la máxima velocidad de respiración con la máxima producción de etileno (figura 20), se observa que en frutos con estas características, el pico de máxima tasa respiratoria se manifestó un día previo al de máxima producción de etileno, resultados similares han sido reportados por Alique y Zamorano (2000) en chirimoya donde el pico de máxima tasa respiratoria y de producción de etileno, se localizaron a los tres y cuatro días después de la cosecha, respectivamente.

V. CONCLUSIONES

La caracterización física de ilama indica frutos con masa promedio de 256.2 g y 60.7% de pulpa de color rosa con L^* de 62.6%, forma ovoide, base unida, carpelos sobresalientes y volumen de 291.9 cm³.

Se encontró diferencia estadística significativa, para la condición térmica de almacenamiento (12°C y 20°C), la intensidad de microperforado (bolsa intacta, 5, 10 y 20 μ P) y la interacción entre ambos factores. En 20°C las concentraciones instaladas fueron de 11.77% O₂ y 10.68% CO₂, y para 12°C se encontraron en 13.94% O₂ y 5.38% CO₂.

A 20°C y sistema de almacenamiento con 10 microperforaciones, la pérdida de peso en la ilama fue de 6% en 5 días, 11% en 10 días y 16% en 15 días.

Los frutos cosechados a 85 DDF, presentaron su pico de máxima tasa respiratoria a los 9 días después de su cosecha con 253 mL de CO₂·kg⁻¹·h⁻¹.

La producción de etileno no se encontró al inicio del periodo de almacenamiento, siendo hasta el día siete evidente su presencia, con su pico climatérico en el día 10 después de la cosecha con 1126 μ L·kg⁻¹·h⁻¹.

Las evaluaciones indican a la ilama como un fruto climatérico, con alta tasa respiratoria, manifestándose el pico de máxima tasa respiratoria un día previo al de máxima producción de etileno.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Agar, I.T., Massantini, R., Hess-Pierce, B., Kader, A.A. 1999. Postharvest CO₂ and ethylene production and quality maintenance of fresh-cut kiwifruit slices. *Journal of Food Science* 64(3): 433-440.

Aguayo, E., Escalona, V.H., Artés-Hernández, F., Artés, F. 2005. Envasado en atmósfera modificada de ciruela en palets comerciales provistos de ventana de difusión en elastómero de silicona. 4^{to} Congreso Iberoamericano de Tecnología Postcosecha Agroexportaciones. Porto Alegre, Brasil. CD Rom.

Alique, R., Zamorano, J.P. 2000. Influence of harvest date within the season and cold storage on cherimoya fruit ripening. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48: 4209-4216.

Alique, R., Martínez, M., Alonso, J. 2003. Influence of the modified atmosphere packaging on shelf live and quality of Navalinda sweet cherry. *European Food Research and Technology* 217: 416-420.

Amarante, C., Banks, N.H. 2001. Postharvest physiology and quality of coated fruits and vegetables. *Hort. Rev.* 26: 261-238.

AOAC. 1980. Oficial method of analysis. Asociation of Oficial Analytical Chemist. William Horwitz (De). 13th Ed. Washington D.C., USA.

Ares, G., Parentelli, C., Gámbaro, C.L., Lema, P. 2006. Sensory shelf life of shiitake mushrooms stored under pasive modified atmosphere. *Postharvest Biology and Technology* 41(2): 191-197.

Azurdia, C., González, M. 1986. Informe final del proyecto de recolección de algunos cultivos nativos de Guatemala. Consejo Internacional de Recursos Fitogenético (CIRF). Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala (FAUSAC). Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA). pp. 220-223.

Banks, N.H., Cleland, D.J., Cameron, A.C., Beaudry, R.M., Kader, A.A. 1995. Proposal for rationalized system of units for postharvest research in gas exchange. *HortScience* 30(6): 1129-1131.

Beaudry, R.M., Cameron, A.C., Shirazi, A., Dostal-Lange, D.L. 1992. Modified atmosphere packaging of blueberry fruit: effect of temperature on package O₂ and CO₂. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117(3): 436-441.

Beaudry, R.M. 1999. Effect of O₂ y CO₂ partial pressure on selected phenomena affecting fruit and vegetable quality. *Postharvest Biology and Technology* 15: 293-303.

Berrios, J.J. 2002. Development of a dynamically modified atmosphere storage system applied to avocados. *Food Science Technology International* 8(3): 155-162.

Brencht, J.K., Chau, K.V., Fonseca, S.C., Oliveira, F.A.R., Silva, F.M., Núñez, M.C.N., Bender, R.J. 2002. Maintaining optimal atmosphere conditions for fruits and vegetables throughout the postharvest handling chain. *Postharvest Biology and Technology* 27: 87-101.

Brody, A.L. 2005. What's fresh about fresh-cut. *Food Technology* 59: 74-77.

Cameron, A.C., Talasalia, P.C., Joles D.J. 1995. Predicting the film permeability needs for modified-atmosphere packaging of lightly processed fruits and vegetables. *HortScience* 30: 25-34.

Cantwell, M. 1995. Fresh-cut product biology requirements. *California Perishables Handling* 81: 4-6.

Chávez, P.E.M., Marroquín, A.L., Cedillo, P.E., Cervera, B.E. 1999. Estudio etnobotánico de llama (*Annona diversifolia* Saff.) en Tejupilco, Estado de México, pp: 118-124. *In: II Congreso Internacional de Anonáceas*. L., Marroquín, M., Pérez (eds.). Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Octubre 26, 27 y 28.

Cliffe, B.V., O'Beirne, D. 2007. Effects of gas atmosphere and temperature on the respiration rates of whole and slice mushrooms (*Agaricus bisporus*) implications for film permeability in modified atmosphere packages. *Journal of Food Science* 72: 197-204.

Cruz, E., Deras, H. 2000. Colecta y establecimiento de anonáceas en El Salvador. *Agronomía Mesoamericana* 11(2): 91-95.

Estrada, C.A., Marroquín, L.M. 1995. Caracterización de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) en Salitre Palmerillos, Ametepec, Edo. de México. Interamerican Society for Tropical Horticulture 38: 197-200.

FAO. 1992. Annonas (*Annona* spp.), pp: 83-90. *In*: Cultivos Marginados. Otra Perspectiva. J.E., Hernández, B.J., León (ed.). Roma, Italia.

FAO. 2005. Estadísticas de producción. Consultado el 6 de mayo de 2009. Disponible en <http://www.fao.org>.

Farber, J.M. 1991. Microbiological aspects of modified-atmosphere packaging technology. Journal of Food Protection 54(1): 58-70.

Fonseca, C.S., Oliveira, F.A.R., Brencht, K.J. 2002. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmospheres packages: a review. Journal of Food Engineering 52: 99-119.

George, A.P., Nissen, R.J. 1987. The effects of day/night temperatures on growth and dry matter production of custard apple (*Annona cherimola*) cultivar 'African Pride'. Scientia Horticulturae 31: 269-274.

George, A.P., Nissen, R.J., Howit, C. 1990. Effects of environmental variables and cropping of leaf conductance of custard apple (*Annona cherimola*) 'African Pride'. Scientia Horticulturae 45: 137-147.

González-Trujano, M.E., Navarrete, A., Reyes, B., Cedillo, P.E., Hong, E. 2001. Anticonvulsant properties and bio-guided isolation of palmitone from leaves of *Annona diversifolia*. Plant Medic 67: 136-141.

González-Trujano, M.E., Briones, V.M., Navarrete, C.A., Rocha, L. 2006. La epilepsia y la ilama. *Epilepsia* 47(11): 1810-1817.

Gutiérrez, C.Y. 2009. Proyecto de desarrollo productivo. Cadena de valor frutícola (Análisis del mercado para anona). Programa Nacional de Frutas. El Salvador. 80 p.

Hernández, A.M.G. 2003. Evaluación poscosecha de seis especies aromáticas. Tesis Licenciatura. Departamento de Fitotecnia. UACH. 85 p.

Hubbard, N.L., Pharr, D.M., Huber, S.C. 1990. Role of sucrose phosphate synthase in sucrose biosynthesis in ripening bananas and its relationship to the respiratory climacteric. *Plant Physiology* 94: 201-208.

Hutchings, B.J. 1999. Food color and appearance. Segunda edición. Ed. Aspen Publishers. USA. 610 p.

Kader, A.A. 1992. Biología y tecnología poscosecha: una revisión general. *Postharvest Technology of Horticultural Crops*.

Kader, A.A., Lange, D.L. 1997. Elevated carbon dioxide exposure alters intracellular pH and energy charge in avocado fruit tissue. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 122(2): 253-257.

Kader, A.A. 2002. Modified atmospheres during transport and storage, pp. 134-144. *In: Postharvest Technology of Horticultural Crops*. A.A., Kader (ed.). University of California Agriculture and Natural Resources. Davis, USA.

Kader, A.A. 2007. Tecnología poscosecha de cultivos hortofrutícolas. Tercera Edición. Universidad de California. Centro de Investigación y Tecnología Poscosecha. USA. pp. 234-244.

Kester, J.J., Fennema, O. 1986. Edible films and coatings. Food Technology 40(1): 47-59.

Lee, D.S., Hagggar, P.E., Lee, J., Yam, K.L. 1991. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics. Journal of Food Science 56: 1580-1585.

León-Guzmán, M., Silva, I., López, G.M. 1997. Proximate chemical composition, free amino acid contents and free fatty acid contents of some wild edible mushrooms from Queretaro, México. Journal of Agricultural and Food Chemistry 45: 4329-4332.

León, J. 1989. Compendio de Agronomía Tropical. Tomo II. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. pp. 274-285.

Maalekuu, K., Elikind, Y., Tuvia-Alkalai, S., Shalom, Y., Fallik, E. 2003. Quality evaluation of three sweet pepper cultivars after prolonged storage. Advances in Horticultural Science 17: 187-191.

Mahajan, P.V., Goswami, T.K. 2004. Extended storage life of litchi fruit using controlled atmosphere and low temperature. Journal of Food Processing and Preservation 28: 388-403.

Martínez-Flores, A., Corrales-García, J.J., Espinoza-Solares, T., García-Gatica P.G., Villanueva-Verduzco, C. 2008. Cambios postcosecha del hongo comestible huitlacoche (*Ustilago maydis* (D.C.) Corda). Revista Chapingo Serie Horticultura 14(3): 339-346.

Martínez-Jávega, J.M., Eslava, E., Navarro, P. 1992. Influencia de la prerrefrigeración y embalaje en el almacenamiento frigorífico de cerezas cv. "Bourlat". Congreso Internacional de Tecnología y Desarrollo de Alimentos Murcia, España. pp. 40-44.

McGuire, R.G. 1992. Reporting of objective color measurements. HortScience 27: 1254-1255.

Meller, B., Anderson, D. 1976. Introducción a la fisiología vegetal. Ed. Universitaria. Buenos Aires, Argentina. pp. 80-106.

Mendoza-Wilson, A.M., Báez-Sañudo, R. 2000. Medición de la tasa respiratoria por sistema cerrado en melón cantaloupe. Horticultura Mexicana 8(2): 158-163.

Minolta. 1994. Precise color communication. Minolta Corporation Instrument System Division. Ramsey, NJ, USA. 79 p.

Monroy-Gutiérrez, T. 2009. Conservación de huitlacoche (*Ustilago maydis* DC) mínimamente procesado en atmósferas modificadas basadas en microperforado. Tesis de maestría. UACH. 82 p.

Montanez, J., Oliveira, A.R.F., Frías, J., Pinelo, M., Mahajan, V.P., Cunha, M.L. Manso, C.M. 2005. Design of perforation-mediated modified atmosphere

packaging for shredded carrots: mathematical modelling and experimental validation. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 118: 423-428.

Moreno-Velázquez, D., Saucedo-Veloz, C., Arévalo-Galarza, L., Peña-Valdivia, C.B., Soto-Hernández, M., Cruz-Lagunas, B. 2008. Cambios bioquímicos, biofísicos y fisiológicos durante el crecimiento y maduración del fruto de ilama (*Annona diversifolia* Saff.). *Agrociencia* 42(4): 407-414.

Morton, J. 1987. Ilama, pp. 83–85. *In*: *Fruits of Warm Climates*. F.J., Morton (ed.). Creative Resource Systems. Miami, FL, USA.

Nakasone, H.Y., Paull, E.R. 1998. *Tropical Fruits*. CAB International. New York, USA. 445 p.

Otero-Sánchez, M.A., Becerril, R.A.E., Castillo, M.A., Michel, A.C. 2006. Producción de ilama (*Annona diversifolia* Saff.) en el trópico seco de Guerrero. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12(2): 137-143.

Pantastico, E.R. 1975. *Fisiología de la posrecolección, manejo y utilización de frutos y hortalizas tropicales y subtropicales*. Ed. CECSA. México.

Parry, R.T. 1995. *Envasado de los alimentos en atmósferas modificadas*. Ed. A. Madrid. Madrid, España. 230 p.

Pennington, T.D., Sarunkhan, J. 1968. *Arboles tropicales de México: Manual para la identificación de las principales especies*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. México, D. F. 521 p.

Pesis, E. 2005. The role of the anaerobic metabolites, acetaldehyde and ethanol in fruit ripening, enhancement of fruit quality and fruit deterioration. *Postharvest Biology and Technology* 37: 1-19.

Petracek, P.D., Joles, D.W., Shirazi, A., Cameron, A.C. 2002. Modified atmosphere packaging of sweet cherry (*Prunus avium* L., cv 'Sams') fruit: metabolic responses to oxygen, carbon dioxide and temperature. *Postharvest Biology and Technology* 24: 259-270.

Piña-Dumoulin, G., Saucedo, V.C., Ayala, E.V., Muratalla, A.L. 2001. Atmósferas controladas para combatir daños postcosecha en Zarzamora (*Rubus* sp.). *Revista de la Facultad de Agronomía* 18: 87-105.

Podd, L.A., Van Staden, J. 1998. The role of ethanol and acetaldehyde in flower senescence and fruit ripening - A review. *Plant Growth and Regulation* 26: 183-189.

Popenoe, W. 1920. Manual of tropical and subtropical fruits. Hafner Press. MacMillan Pub. Co. New York, USA. pp. 188-195.

Raj, R.D., Paul S. 2007. Transient state in-pack respiration rates of mushroom under modified atmosphere packaging based on enzyme kinetics. *Biosystems Engineering* 98: 319-326.

Renault, P., Souty, M., Chambroy, Y. 1994. Gas exchange in modified atmosphere packaging. A new theoretical approach for micro-perforated packs. *International Journal of Food Science and Technology* 29: 365-378.

Rodríguez-Félix, A., Rivera-Domínguez, M., González-Aguilar, G.A. Uso de atmósferas modificadas y controladas, pp. 447-471. *In: Nuevas Tecnologías de Conservación de Productos Vegetales Frescos Cortados*. González-Aguilar (eds.). CIAD CYTED-CONACYT-COFUPRO. México.

Romero, F., Riquelme, F., Pretel, M.T., Martínez, G., Serrano, M., Martínez, C., Lozano, P., Segura, P., Luna, P.A. 1996. Nuevas tecnologías de conservación de frutas y hortalizas: atmósferas modificadas. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 221 p.

Ryall, L.A., Lipton, W.J. 1982. Refrigerated storage, pp: 293-306. *In: Handling Transportation and Storage of Fruits and Vegetables*. L. Ryall, W. Lipton (eds.). AVI Publishing Company, INC. Westport, Connecticut, USA.

Salvador, M.L., Jaime, P., Oria, R. 2002. Modeling of O₂ y CO₂ exchange dynamics in modified atmosphere packaging of Burlat cherries. *Journal of Food Science* 67: 231-235.

SAS. 1989. User's Guide. Versión 6. SAS/STAT®. Cary, NC. SAS Institute Inc. pp. 209-243.

Schilimpe, D.V. 1995. Marketing lightly processed fruits and vegetables. *HortScience* 30: 15-17.

Schilimpe, D., Rooney, M. 1997. Envasado de frutas y hortalizas mínimamente procesadas, pp. 137-178. *In: Frutas y Hortalizas Mínimamente Procesadas y Refrigeradas*. R., Wiley (eds.). Zaragoza. España.

Simón, A., González-Fandos, E., Tovar, V. 2005. The sensory and microbiological quality of fresh sliced mushrooms (*Agaricus bisporus*) packaged in modified atmospheres. *International Journal of Food Science and Technology* 40: 943-952.

Smith, A.C., Waldron, K.W., Maness, N. 2003. Vegetable texture: measurement and structural implications, pp. 297-329. *In: Postharvest Physiology and Pathology of Vegetables*. J.A., Bartz (eds.). Marcel Dekker Inc. New York, USA.

Standley, C., Steyermark, J. 1946. Flora of Guatemala. Natural History Museum. *Fieldiana Botany* 24(4): 272-280.

Taiz, L., Zeiger, E. 1998. Plant physiology. Sinauer Associates, Inc., Publishers. Massachusetts, USA. 792 p.

Talasila, P.C., Cameron, A.C., Joles, D.W. 1994. Frequency distribution of steady-state oxygen partial pressures in modified-atmosphere packages of cut broccoli. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 119: 556-562.

Tano, K., Oulé, K.M., Doyon, G., Castaigne, F. 1999. Atmospheric composition and quality of fresh mushrooms in modified atmosphere packages as affected by storage temperature abuse. *Journal of Food Science* 64(6): 1073-1077.

Valle-Guadarrama, S., Saucedo-Veloz, C., Peña-Valdivia, C.B., Corrales-García, J.J.E., Chávez-Franco, S.H., Espinosa-Solares, T. 2002. Skin permeance and internal gas composition in "Hass" avocado (*Persea Americana* Mill.) fruits. *Food Science and Technology International* 119: 556-562.

Valle-Guadarrama, S., Saucedo-Veloz, C., Peña-Valdivia, C.B., Corrales-García, J.J.E., Chávez-Franco, S.H. 2004. Aerobic-anaerobic metabolic transition in 'Hass' avocado fruits. *Food Science and Technology International* 10(6): 391-398.

Valle-Guadarrama, S., Alonso-Campos, A., Alia-Tejacal, I. 2008. Atmósferas con bajo O₂ y alto CO₂ para la conservación de frutos de litchi. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31(2): 157-164.

Ventura-Aguilar, R., Colinas-León, Ma.T., Martínez-Damián, Ma.T., Valle-Guadarrama-Salvador. 2011. Atmósferas Modificadas, frigo conservación e inhibidores del oscurecimiento en poscosecha de *Pleurotus ostreatus*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(2): 197-206.

Villaescusa, R., Gil, M.I. 2003. Quality improvement of *Pleurotus* mushrooms by modified atmosphere packaging and moisture absorbers. *Postharvest Biology and Technology* 28: 169-179.

Watkins, C. 2000. Responses of horticultural commodities to high carbon dioxide as related to modified atmosphere packaging. *HortTechnology* 10: 501-506.

Wills, R., McGlasson, B., Graham, D., Joyce, D. 1984. Fisiología y manipulación de frutos y hortalizas postrecolección. Ed. Acribia. Zaragoza, España.

Witham, H.F., Blaydes, D.F., Devlin, R.M. 1971. *Experiment in Plant Physiology*. Van Nostrand Reinhold C. New York, USA. 245 p.

Yahia, E.M. 1992. Tecnología de atmósferas controladas y modificadas. I Reunión Latinoamericana de Tecnología Postcosecha. UAM-Iztapalapa. México, D.F. pp. 123-145.