

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Mora azul o mirtilo

Esta fruta pertenece al género *Vaccinium*, crece como arbusto pequeño, es una mora de consistencia suave, contiene semillas suaves que son bien aceptadas por los consumidores. Es una especie nativa de Estados Unidos, siendo este país y Canadá los líderes exportadores, ya que abarcan el 90 % de la producción mundial. En Estados Unidos la cosecha abarca de mediados de abril a principios de octubre, en julio se tiene el pico de cosecha (mayor producción en el año) por lo que se conoce como el mes nacional de la mora azul, esta fruta se cultiva en más de 30 estados y esta disponible durante 8 de los 12 meses del año (Payne, 2003).

En México, aunque no es tan común, se cosecha mora azul en los meses de mayo a septiembre. En el estado de Puebla, en la región de Zacatlán, se cosecha el 85% de la producción nacional de mora azul, ya que el clima templado - húmedo del lugar y el pH =5 del suelo constituyen las condiciones ideales para el crecimiento de esta fruta, también se cosecha en el estado de México (15% restante) y Michoacán. (Rancho la concordia, 2003; González, 2004).

La planta de mora azul florea en primavera, el desarrollo de la fruta se lleva a cabo durante los 2 – 3 meses posteriores a la floración, dependiendo del cultivo, clima, vigor de la planta. Durante la maduración el contenido de azúcar se incrementa en un 15%. El rendimiento de los arbustos puede ser tan alto como 20 toneladas por acre (Cain y Eck, 1966).

Esta fruta se clasifica de acuerdo a la etapa de la estación en la cual se cosecha (temprana, temprana – media, media, media – final y final), además si son para consumo en fresco se cosechan a mano y si son para procesarse se cosechan con máquina, la cosecha se realiza cuando 90% de la fruta ya esta azul (Stewart, 1996).

Entre los factores de calidad importantes para esta fruta se encuentra el tamaño, en la tabla I se muestra la clasificación de la fruta de acuerdo a su tamaño (Payne, 2003).

Tabla I. Clasificación de la mora azul según el tamaño.

Extra grande	<90 por taza
Grande	90 - 129 por taza
Mediana	130 - 189 por taza
Pequeña	190 - 250 por taza

Fuente Payne (2003).

De acuerdo al consejo de la mora azul en Estados Unidos (Payne, 2003) la fruta fresca se empaca en cajas de plástico y cartón. Las condiciones óptimas de almacenamiento son 0-1°C y una humedad relativa de 90 – 95%.

Las especies de mora azul de interés comercial son: *V. Lamarckii*, *V. Pennsylvanicum*, *V. Canadense* (principalmente en Canadá), *V. Pallidum* (dryland blueberry), *V. vacillans* (huckleberry) *V. Ovatum* (evergreen blueberry) *V. Membranaceum* (mountain blueberry). En Puebla se cultiva principalmente la variedad *V. Ashei* (ojo de conejo) (Rancho la concordia, 2003).

Las variedades de mora azul de arbustos pequeños, producen frutos pequeños y las de arbustos grandes, frutos grandes. Las moras variedad rabbit eye (ojo de conejo) se encuentran dentro de las que producen frutos grandes (Luh y Kean, 1975).

La mora azul es una fruta de rápido crecimiento, madura de 2 – 3 meses después de que el arbusto florea y durante un periodo se pueden hacer varias cosechas, después de alcanzar su color característico (azul) ya no hay gran cambio en tamaño pero si hay mejoras en sabor y dulzura, por lo que se cosecha varios días después.

Existe una amplia variedad de productos en el mercado a base de mora azul, por ejemplo: en Japón, la compañía House Brand creó unas píldoras que contienen, cada una, la misma cantidad de antocianinas que 90 g de esta fruta y son recomendables para personas que pasan mucho tiempo frente a la computadora; en Taiwan desde julio del 2000 se vende una bebida carbonatada enriquecida con calcio a base de la misma fruta;

en mayo de 1999 una compañía de Estados Unidos introdujo en Japón cerveza de mora azul, elaborada a partir de la variedad “Huckleberry Wheat” (trigo de mora azul) (Payne, 2003).



Pildoras de mora azul para usuarios de computadoras



Cerveza de mora azul



Bebidas de mora azul enriquecidas con calcio

Figura 4.1. Productos a base de mora azul

4.1.1 Composición

En la tabla II se presenta la composición de mora azul de acuerdo a USDA (1975).

Tabla II. Composición de mora azul (100g de fruta).

Parámetro	Contenido
Contenido energético	58 calorías
Proteínas	1.32 g
Grasa total	0.0 g
Colesterol	0.0 g
Carbohidratos	17.06 g
Azúcares	2.15 g
Fibra dietética	0.64 g
Calcio	41 mg
Hierro	1.40 mg
Retinol	18 mg
Acido ascórbico	13 mg
Tiamina	0.4 mg
Riboflavina	0.3 mg
Niacina	0.8 mg

El contenido de azúcares en la mora azul está constituido por: 49% fructosa, 48% glucosa, y 3% sucrosa (Wills et al., 1981). En cuanto a su valor nutricional la mora azul contiene altos niveles de vitamina C.

Esta fruta es rica en antocianinas, que le dan el color azul luminoso característico y que además está influenciado por la cera epicuticular, contiene una mezcla compleja de ellas, alrededor de 15: malvidina, petunidina, peonidina, cianidina 3 glucósido, galactosidos y arabinosidos (Van Buren, 1970). De acuerdo a Lee y Wrolstad (2004) en blueberry variedad *Rubel* las antocianinas se encuentran casi exclusivamente en la cáscara y los compuestos polifenólicos en cáscara y en menor proporción en el fruto y las semillas, estos compuestos se encuentran distribuidos en toda la fruta no sólo

en la cáscara; también tiene aunque en menor proporción taninos, ácidos fenólicos y flavonas. De acuerdo a Gross (1987) el contenido de antocianinas se incrementa gradualmente durante la maduración, por tal razón se considera un parámetro de calidad.

Los antioxidantes de frutas y hortalizas son importantes para reducir el riesgo de enfermedades degenerativas como enfermedades cardiovasculares, neurológicas y cáncer, que son provocadas por estrés oxidativo donde los radicales libres están implicados (Ehlenfeldt y Prior, 2001), dan protección contra los dañinos radicales libres. Además la ingesta de frutas y hortalizas reduce la presión en la sangre, mejora el sistema inmunológico, destoxifica y reduce inflamaciones (Wang y Jiao, 2000; Kalt et al., 1999; Zheng y Wang, 2003).

Estos antioxidantes de frutas son vitamina C, vitamina E, compuestos fenólicos, carotenoides, flavonoides; estos últimos incluyen a flavonas, isoflavonas, flavononas, antocianinas y catequinas (Ehlenfeldt et al., 2001).

La mora azul tiene una gran capacidad antioxidante respecto a otras frutas frescas debido a su alto contenido de antocianinas y otros compuestos. Kalt et al., (1999) determinaron la capacidad antioxidante midiendo la capacidad de absorción del radical oxígeno (ORAC) de fresas, frambuesas, moras azules de arbusto bajo y arbusto alto almacenadas a 0, 10, 20 y 30°C durante 8 días y concluyeron que la capacidad antioxidante de ambas especies de mora azul fue el triple que la presentada por fresas y frambuesas.

La actividad antioxidante de frutas y verduras se puede ver afectada por factores como la madurez al momento de cosechar, estado de madurez, diferencias genéticas, condiciones ambientales precosecha, condiciones de almacenamiento postcosecha y el procesado, en el caso de la mora azul se han demostrado que existen diferencias genéticas(Connor et al., 2002), por ejemplo Kalt et al., (1999) reportaron que las cosechas tardías de *V. Ashei* variedad Tifblue y Brighthwell tuvieron mayor actividad antioxidante que las tempranas.

Respecto a los sólidos solubles, la mora azul tiene 7°Bx cuando está verde y alrededor de 15°Bx cuando madura, los primeros frutos en madurar alcanzan mayores °Bx que los que maduran hacia el final de la temporada (Galleta y Himelrick, 1990). Es importante que la fruta se corte del árbol hasta que haya madurado por completo pues si se corta antes no alcanza los °Bx deseados.

Las características de mora azul madura son:

- ❖ Azúcares reductores (% p/p) 12.4
- ❖ Sacarosa (% p/p) 1.4
- ❖ Azúcar total (% p/p) 13.8
- ❖ Relación azúcar/ ácido 31
- ❖ Volumen 1 – 5 cm³

Además conforme la fruta madura el contenido de azúcar aumenta y la acidez disminuye (Green, 1971).

Bollard (1970) menciona que la mora azul tiene un crecimiento cíclico, que consta de 3 periodos:

- ❖ Periodo I – Hay un rápido crecimiento del pericarpio y semillas en cuanto a tamaño y peso. El endocarpio y la semilla alcanzan casi por completo su tamaño final.
- ❖ Periodo II – Marcada disminución en la velocidad de crecimiento, con un rápido endurecimiento del endocarpio, retardo en el crecimiento del mesocarpio.
- ❖ Periodo III – Crecimiento a la misma velocidad que el periodo I y la fruta madura hacia el final de este periodo.

Por otro lado los compuestos de aroma de esta fruta son: hidroxicitronelo, acetato de farnesil, farsenol y miristicina (Konja y Lovric, 1992).

Los beneficios a la salud atribuidos a la mora azul abarcan:

- Efecto Antienvjecimiento – En investigaciones acerca del cerebro se ha descubierto que pueden revertir la pérdida de memoria a corto plazo y mejorar las habilidades motoras.
- Ayuda a prevenir infecciones del tracto urinario.
- Prevención del cáncer – Sus compuestos pueden inhibir el cáncer.
- Pueden mejorar la visión nocturna y prevenir la vista cansada.

4.2 Fisiología postcosecha de productos vegetales frescos

Los productos vegetales continúan respirando después de la cosecha. Durante la respiración hay transpiración (pérdida de agua), producción de CO₂, reacciones de maduración y senectud, y los vegetales se vuelven más vulnerables al ataque por microorganismos (De Ell y Toivonen, 1999; Exama et al., 1993). La velocidad de respiración depende de condiciones ambientales como temperatura, composición gaseosa y humedad relativa.

Existen dos diferentes tipos de frutos, de acuerdo al comportamiento respiratorio: los frutos climatéricos y los no climatéricos (Paull, 1994). Los climatéricos, presentan un pico característico en su producción de CO₂ indicativo del inicio de los procesos de maduración y senescencia, el cual está precedido de un pico de producción de etileno (C₂H₄) (Pech et al., 1994). Por otro lado, los frutos no climatéricos no presentan un aumento significativo en la producción de etileno. La etapa de maduración comprende sucesos como el desdoblamiento del almidón a azúcares solubles, el ablandamiento de la pulpa, la pérdida del color verde y la aparición de aromas y sabores característicos de la fruta madura (Del Valle y Palma, 2002).

Los productos vegetales frescos que se han modificado por medio de corte o alguna otra operación concerniente a la integridad del producto presentan un aumento considerable en la velocidad de respiración (de 2 a 8 veces), convirtiéndose en productos más perecederos. El aumento en la velocidad de respiración provoca la estimulación en la síntesis de etileno de 5 hasta 100 veces, degradación de polisacáridos por aumento en la actividad enzimática y activación en la glicólisis, degradación de las membranas lipídicas, degradación peptídica y deterioro microbiológico (Jouve, 1993;

Brecht, 1994). La tabla III presenta los valores de producción de CO₂ de algunos productos hortofrutícolas frescos, enteros y cortados, a diferentes temperaturas (Watada et al., 1996).

Tabla III. Producción de CO₂ (mg de CO₂/Kg h) de frutos y vegetales frescos enteros y cortados a cuatro temperaturas.

Producto	Tipo	Temperaturas (°C)			
		0	5	10	20
Pepino	Enteros	2.7	4.3	6.6	15
	Rodajas	3.4	5.4	9.7	45
	% cambio	26	26	47	200
Pimiento	Enteros	7	8	13	68
	Rodajas	7	6	14	105
	% cambio	0	-25	7.7	54
Tomate	Enteros	1.6	2.3	4.7	20
	Rodajas	1.4	3	10	35
	% cambio	-12.5	30	113	73
Plátano sin cáscara	Enteros	7	9	11	94
	Rodajas	8	10	21	119
	% cambio	14	15	94	27
Fresa	Enteras	8	10	23	101
	Sin pedúnculo	6	8	22	122
	% cambio	-24	-17	-3	21

Watada et al. (1996)

Para mejorar la conservación de los vegetales cosechados es necesario reducir la actividad respiratoria, para lo cual se necesita conocer su fisiología.

4.3 Efecto del etileno en la conservación de vegetales frescos

El etileno (C₂H₄) es un compuesto volátil de dos carbonos producido de manera endógena por algunas plantas. Es la olefina más simple y es más ligera que el aire, se oxida con facilidad y es altamente inflamable. Este gas es una hormona vegetal producida en el proceso de maduración de los frutos y en cualquier tejido vegetal como respuesta al daño (Del Valle y Palma, 2002). A niveles tan bajos como de 0.1 µl induce la maduración y senescencia. El etileno se produce en las plantas superiores y su biosíntesis depende del estado de desarrollo de la planta, aumentando durante la abscisión de las hojas y senescencia de las flores. Se produce también por el estrés hídrico, enfermedades o bajas temperaturas (Kieber, 1997; Taiz y Zeiger, 1998; Vermeiren et al., 1999).

El etileno también se produce después de lesión sobre los tejidos debido a la estimulación de ARN mensajero de la enzima ACC sintetizada preexistente en la planta. La biogénesis del etileno es autocatalítica y el gas se libera rápidamente de los tejidos difundiendo a través de los espacios intercelulares hacia fuera del tejido. Este hecho requiere de la eliminación del gas para evitar la rápida maduración del fruto. Los frutos climatéricos muestran un gran incremento en la producción de etileno durante la maduración.

La capacidad que tiene el etileno de estimular la maduración depende de la sensibilidad del tejido. Por ejemplo, muchos frutos cortados de las plantas son más sensibles al etileno que cuando se encuentran unidos a ella. Existen otras hormonas reguladoras que actúan conjuntamente en la maduración de los vegetales como son las auxinas, citocininas, giberelinas y abscisinas (Rushing, 1990; Taiz y Zeiger, 1998).

El etileno favorece la formación de isocoumarina y amargor en zanahorias, lignificación en especies del género *Brassica*, producción de fitoalexinas en cultivos enfermos, producción de metabolitos de estrés en papas, y otros (Watada 1986). También puede afectar el proceso de ablandamiento de un vegetal. El gas producido de manera endógena se acumula en algunos tejidos y podría activar enzimas capaces de hidrolizar la pared celular (celulasas y pectinasas) (Taiz y Zeiger, 1998).

Uno de los principales efectos del etileno es la eliminación del color verde de los vegetales. La pérdida de color es uno de los parámetros más importantes de calidad de los productos vegetales (Abe y Watada, 1991). La pérdida de color se inicia si la planta se expone al etileno y su intensidad difiere con respecto al tiempo de exposición y tipo de vegetal. Se sabe que el etileno induce la activación de la enzima clorofilasa responsable de la degradación de clorofila (Taiz y Zeiger, 1998; Von Elbe y Schwartz, 1996). El uso de atmósfera modificada ayuda a controlar el color en los vegetales o frutas, probablemente mediante inhibición competitiva a la acción del etileno por elevadas concentraciones de CO₂, y por inhibición en la síntesis de etileno por concentraciones reducidas de O₂. En cuanto al efecto del etileno sobre los pigmentos de frutas y hortalizas existe muy poca evidencia de que afecte otros pigmentos diferentes a la clorofila (Watada, 1986; Abe y Watada 1991).

4.4 Métodos de conservación

La calidad de frutas y hortalizas depende del manejo y selección postcosecha de los mismos, esto es que hayan sido cosechadas a la madurez óptima, minimizar el daño por manejo, un manejo higiénico, mantener la humedad y temperatura óptimas (Zagory y Kader, 1988).

Después de considerar la calidad de la materia prima, los métodos de conservación para frutas y hortalizas frescas más empleados se basan en la disminución de la temperatura y/o en la modificación de la atmósfera que rodea el producto (Kader et al., 1989), estas técnicas buscan reducir la IR permitiendo disminuir la pérdida de agua (transpiración), el desarrollo microbiano, la senectud y la maduración y mantener las propiedades sensoriales del producto (sabor, color, textura, etc).

4.4.1 Disminución de la temperatura

La reducción de temperatura por congelación o refrigeración permite reducir la tasa metabólica y enzimática disminuyendo el deterioro de los vegetales almacenados e incrementando su vida de almacenamiento (Phillips, 1996; De Ell y Toivonen, 1999). El enfriamiento con hielo inmediatamente después de la cosecha es una práctica muy común para reducir la actividad metabólica y evitar la pérdida de la humedad del producto (Gillies y Toivonen, 1995), otra práctica común, aunque requiere una mayor inversión inicial, es el enfriar la fruta o vegetales en un túnel de preenfriado, en una empresa empacadora en atmósfera modificada ubicada en Huauchinango, Puebla cuentan con un túnel de preenfriado que puede cambiar la temperatura de 23 a -1°C en 1 ½ h de hasta 4 toneladas de fruta.

La reducción en la actividad metabólica por disminución de la temperatura, representada por la respiración, sigue el modelo de Arrhenius en donde el logaritmo natural de la respiración (r) es proporcional al inverso de la temperatura absoluta (Varoquax y Wiley, 1994):

$$\ln r = \ln r^{\circ} + (-E_r/RT) \quad (1)$$

Donde r° es la constante de intensidad de respiración (ml/kg hr), E_r es la energía de activación de respiración (J/mol) , R es la constante de los gases (8.314 J/mol K) y T es la temperatura (K).

El decremento óptimo en la temperatura es específico para cada vegetal en particular, ya que si se rebasa el límite de temperatura, los vegetales pueden sufrir daño por frío.

4.4.2 Conservación por modificación de la atmósfera

La técnica de conservación basándose en la modificación de la atmósfera interna es efectiva como alternativa y/o complemento a la refrigeración (Del Valle y Palma, 2002). Este método consiste en confinar el alimento en una atmósfera compuesta por una mezcla de gases en proporciones definidas, diferente de la atmósfera normal. Las técnicas más empleadas son el almacenamiento bajo atmósferas controladas (AC) y el empacado bajo atmósferas modificadas (EAM), ambas requieren que la composición gaseosa de la atmósfera que rodea a un vegetal sea rica en CO_2 y pobre en O_2 ya que en buena parte los alimentos se deterioran por reacciones oxidativas, que pueden ser propias del metabolismo celular del producto, del desarrollo de microorganismos patógenos, deteriorativos o insectos aeróbicos; o como resultado de la actividad enzimática que tenga como sustrato el oxígeno (Del Valle y Palma, 2002). Las diferencias entre estas técnicas se observan en la tabla IV.

Tabla IV. Técnicas de conservación por modificación de la atmósfera interna.

Técnica de conservación	Principio
Almacenamiento por atmósferas controladas (AC)	La proporción de cada gas que compone la atmósfera se mantiene al mismo nivel durante el ciclo de distribución, así como la temperatura y la humedad relativa. AC se emplea para el almacenamiento y transporte de grandes cantidades de producto, y requiere de monitoreo constante y control preciso de la composición gaseosa.
Empacado bajo atmósferas modificadas (AM)	Se reemplaza el aire (N ₂ 78.08%, O ₂ 20.95%, CO ₂ 0.035%) en un empaque por un solo gas o una mezcla de gases de composición fija. No se requiere un control sobre la composición que cambia a través del tiempo debido a la respiración del producto, y a la permeación de los gases a través de la película que rodea al producto.

Fuente: Church (1994).

Las atmósferas controladas (AC) se usan principalmente para productos con largos estadios de almacenamiento como manzana, lechuga, kiwi, pera ya que su costo de operación es alto (Zagory y Kader, 1988).

4.5 Empaque bajo atmósfera modificada (EAM)

El principio del empaque bajo atmósferas modificadas (AM) consiste en crear un ambiente con baja concentración de O₂ y alta de CO₂ dentro del empaque. El uso de películas de empaque hace posible la modificación de la composición de O₂ y CO₂ de la atmósfera que rodea los productos frescos de manera individual, sin tener que controlar todo un lote. La atmósfera modificada puede obtenerse por modificación activa o pasiva, en la activa, la atmósfera se modifica durante el empacado generalmente por inyección de una mezcla de gases de una composición dada y en la pasiva la permeabilidad a los gases (O₂, CO₂, etileno y vapor de agua) de las películas y la respiración del producto permitirá la creación de una atmósfera de equilibrio (Church, 1994).

Inmediatamente después de empacar un vegetal, la concentración interior de O₂ comienza a disminuir y la concentración de CO₂, agua y etileno (para frutos climatéricos) se incrementa como consecuencia de la respiración. Si la película es poco

permeable se puede llegar a condiciones de anaerobiosis con la formación de etanol, acetaldehído u otros compuestos orgánicos asociados a olores y calidad indeseable. La tabla V presenta condiciones aproximadas para conservar algunos productos hortofrutícolas por AM, la mayor parte de frutas y hortalizas frescas son sensibles a condiciones de anaerobiosis por lo que deben almacenarse con al menos 5% de O₂ (Del Valle y Palma, 2002).

Tabla V. Condiciones sugeridas para AM de diversos productos hortícolas.

Producto	Temperatura (°C)	% O ₂	% CO ₂
Manzana (Golden delicious)	-0.5 – 2	1 – 3	1 – 5
Arándano	20 – 5	5 – 10	15 – 20
Durazno prisco	0 – 5	1 – 2	3 – 5
Kiwi	0 – 5	1 – 2	3 – 5
Mora	10 – 5	5 – 10	15 – 20
Apio	0 – 5	1 – 4	3 – 5
Brócoli	0 – 5	1 – 2	5 – 10
Cilantro	0 – 5	8 – 10	8 – 10
Espinaca	0 – 5	7 – 10	5 – 10
Tomate	12 – 20	3 – 5	2 – 3

Fuente Del Valle y Palma, 2002

En un EAM bajo condiciones de equilibrio, las velocidades de producción de CO₂ y de consumo de O₂ son iguales a las velocidades de permeación de los gases que pasan a través de la película, además un sistema de empaque ideal bajo AM deberá tener un balance óptimo de niveles de CO₂ y O₂ durante el almacenamiento, transporte, manipulación y distribución del producto empacado. En el empaque bajo atmósferas modificadas se requiere del uso de películas con permeabilidad específica y las permeabilidades a O₂ y CO₂ deberán definirse en función de la IR del vegetal, la temperatura y la atmósfera deseada alrededor del producto (Davies, 1995).

De acuerdo a las propiedades de permeabilidad de la película, pueden ocurrir tres situaciones en la atmósfera interna del empaque:

- Si es una película impermeable se pueden generar condiciones de anaerobiosis lo que provoca deterioro fisiológico del producto.
- Si la película es demasiado permeable se pueden generar condiciones de aerobiosis que provocan deshidratación y pérdida de peso del producto.
- Si la película es de permeabilidad intermedia generará un balance adecuado en los niveles de O₂ y CO₂ en AM y conservará al producto por mayor tiempo.

En la tabla VI se resumen las principales ventajas y desventajas en el uso de AM para alimentos.

Tabla VI. Ventajas y desventajas en el uso de AM en alimentos.

Ventajas	Desventajas
Incrementa la vida de almacenamiento del 50 hasta el 400%. Reduce pérdidas económicas. Permite comercializar y distribuir los productos a grandes distancias. Mantiene a los productos con alta calidad. Mejora la presentación – visibilidad clara del producto. Disminuye o elimina el uso de conservadores químicos.	Aumenta los costos de empaque. Emplea control de temperatura. Requiere formulaciones de gases específicas para cada producto. Los beneficios se pierden una vez abierto el empaque. El volumen del empaque aumenta.
<ul style="list-style-type: none"> • Frutas y Hortalizas Retarda la maduración. Reduce la producción y la sensibilidad al etileno. Retarda el ablandamiento y otras reacciones asociadas a la maduración. Puede reducir el daño por frío.	<ul style="list-style-type: none"> • Frutas y Hortalizas Si los niveles de CO ₂ son más altos que los que el producto tolera puede tener daño fisiológico. Si los niveles de O ₂ son bajos puede haber respiración anaeróbica y producirse malos olores debido a la acumulación de etanol y acetaldehído.

Fuente: Davies (1995), Zagory y Kader, (1988)

4.5.1 Efecto de los gases en una AM

Los gases de mayor importancia en AM para frutas y vegetales frescos son O₂, N₂, y CO₂, sus efectos se observan en la tabla VII (Phillips, 1996). El O₂ es necesario tanto por los microorganismos aerobios como por los tejidos del vegetal almacenado, participando en algunas reacciones enzimáticas, en AM se busca la reducción hasta los niveles más bajos posibles de este gas pero a los cuales aún se cubran los requerimientos del mismo para la respiración, la retención de color, o para evitar condiciones anaerobias. N₂ es un gas inerte, con baja solubilidad en agua y grasas, y se usa fundamentalmente en un AM para desplazar el O₂ y para prevenir el enranciamiento en frutos secos.

El CO₂ por su lado ejerce un efecto inhibitorio sobre el crecimiento bacteriano, especialmente contra bacterias aerobias degradadoras gram negativas, tales como *Pseudomonas sp.*, las que provocan pérdida de color y malos olores en los alimentos.

El control del vapor de agua dentro de un EAM es importante por que si las frutas y hortalizas pierden agua pierden turgor y si por el contrario se tiene una alta HR puede presentarse condensación afectando la apariencia y creando condiciones propicias para el crecimiento de microorganismos patógenos y deteriorativos (Zagory y Kader, 1988).

Tabla VII. Principales efectos químicos y bioquímicos de los gases en los vegetales almacenados bajo AM.

Gas	Efecto
CO ₂	<p>Inhibe la respiración del vegetal Acidifica el líquido tisular (altamente soluble en agua) Puede desnaturalizar proteínas Inhibe a la hormona de la maduración (etileno) Inhibe la hidrólisis de las pectinas (evitando fluidificación) Disminuye la IR Disminuye la maduración de los vegetales Reduce el daño por frío de los tejidos vegetales Efecto bacteriostático sobre los microorganismos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Altera la membrana celular para toma de nutrientes y absorción ➤ Inhibe enzimáticamente o disminuye la velocidad de las reacciones ➤ Genera cambios en el pH intracelular por su alta solubilidad en lípidos ➤ Cambia las propiedades fisicoquímicas de las proteínas
O ₂	<p>Activa la oxidación enzimática y química Activa la degradación del beta caroteno Es el sustrato de la respiración Estimula el crecimiento de bacterias aerobias Inhibe el crecimiento de bacterias anaerobias (> 10% en volumen)</p>
N ₂	<p>Inhibe algunas proteasas (enzimas que fragmentan las proteínas) Inhibe algunas lipasas (enzimas que causan enranciamiento) Inhibe algunas descarboxilasas (enzimas respiratorias)</p>

Tabla: Church (1994); Davies (1995); Piergiovanni (1995).

4.5.2 Factores que afectan el EAM

Los principales factores que afectan el EAM de frutas y hortalizas son los siguientes (Zagory y Kader, 1988):

1. Factores debidos al producto a empacar

- a. Resistencia a la difusión de O₂, CO₂, C₂H₄ y H₂O. – La mayoría de frutas y hortalizas toleran niveles de O₂ de hasta 1 – 5 % y niveles de CO₂ de hasta 5 – 10%. Las diferencias en resistencia a la difusión se deben a diferencias anatómicas y bioquímicas.
- b. Respiración. – El efecto de la AM es disminuir la velocidad de respiración haciendo más lento el metabolismo y por consiguiente alargando la vida de anaquel del producto. La velocidad de respiración depende tanto del proceso de maduración del producto (influencia interna) como de los cambios en concentración de O₂ y CO₂ (influencia externa).
- c. Producción y sensibilidad al etileno. – En el EAM se puede retardar el climaterio prolongando así la vida del producto, esto se logra reduciendo la producción de etileno ya sea disminuyendo el O₂ o aumentando el CO₂ o ambos ya que su efecto es aditivo.
- d. Temperatura óptima. – Es aquella que retarda la senescencia del producto y mantiene la calidad del producto sin causar daño por frío u otro daño. Los productos tropicales son sensibles a las bajas temperaturas y no se deben almacenar a menos de 13°C, sin embargo los productos que no son sensibles al daño por frío pueden almacenarse hasta a 0°C.
- e. Humedad relativa óptima. – Es importante controlar la humedad relativa ya que si es muy baja aumenta la transpiración y el producto se reseca y si es alta puede haber condensación acelerándose el deterioro del producto debido a microorganismos.
- f. Concentración de O₂ y CO₂ óptimas. – Una atmósfera óptima disminuye la velocidad de respiración sin provocar daño metabólico en el producto. El efecto de disminuir O₂ y aumentar CO₂ es aditivo por lo que se deben hacer pruebas experimentales en varias atmósferas. Es importante considerar que la atmósfera dentro de un

empaque puede tener fluctuaciones, así que la atmósfera óptima no debe estar cercana a una que pueda provocar deterioro.

2. Factores ambientales

- a. Temperatura y humedad relativa óptimas. – La temperatura del producto empacado en AM variará más lentamente que cuando no está empacado por intervención de la película de empaque. La permeabilidad de la película se incrementa con el aumento de temperatura en mayor proporción para CO₂ que O₂. La humedad relativa tiene un efecto ligero en la permeabilidad de la película excepto si hay condensación de vapor de agua. La mayoría de las películas tienen una alta barrera al vapor de agua.
- b. Luz. – Afecta principalmente a frutas y hortalizas verdes ya que puede provocar que consuman CO₂ y produzcan O₂ por un proceso fotosintético, contrarrestando el efecto de la AM que busca conservar la atmósfera óptima dentro del empaque.
- c. Factores de sanidad. – Hay que considerar que el empacado de frutas y hortalizas en empaques plásticos puede crear una atmósfera de alta humedad, baja en oxígeno favoreciendo el crecimiento de microorganismos como *Botrytis* y *Geotrichum*.

4.5.3 Efecto de AM sobre el etileno

La tecnología de AM es efectiva en retardar la maduración del fruto controlando los efectos y biosíntesis del etileno. Bajas concentraciones de O₂ inhiben la acción de la enzima formadora de etileno (EFE), así disminuyen la transformación del ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) a etileno. Además niveles de O₂ menores a 8% y niveles de CO₂ superiores al 1% reducen la sensibilidad de vegetales al etileno (Kader, 1992).

4.5.4 Efecto de AM sobre patógenos e insectos

La técnica AM no es tan efectiva para inhibir a los microorganismos patógenos debido a que los niveles de O₂ y CO₂ necesarios para afectar el metabolismo de los

mismos son también normalmente tóxicos para las células vegetales de frutas y hortalizas, por esta razón su aplicación se ha reducido a productos deshidratados, nueces, cereales y otros alimentos a granel de baja humedad; además del transporte o almacenamiento por periodos cortos de variedades resistentes a altas concentraciones de CO₂ como las moras, frambuesas, cerezas, higos y uvas (Del Valle y Palma, 2002).

Las bajas concentraciones de O₂ interfieren con el metabolismo de los patógenos aeróbicos, mientras que las altas concentraciones de CO₂ han demostrado ser fungistáticas y bacteriostáticas. Además aunque el CO₂ disminuye el pH interno de los tejidos, se necesitan concentraciones muy altas (aprox. 80%) para disminuirlo de manera efectiva. (Del Valle y Palma, 2002).

Para controlar insectos usando AM se requieren altas temperaturas, bajas humedades relativas y concentraciones de gas extremas por varios días, esto hace poco viable su uso para control cuarentenario de plagas en frutas y hortalizas frescas (Mitchell y Kader, 1992), en cambio para alimentos de baja humedad si es posible su uso como tratamiento de fumigación rápida y para almacenamiento prolongado.

4.6 Diseño de un empaque bajo AM

La función del empaque es proteger a los productos de daño mecánico y biológico durante su almacenamiento, transporte y comercialización y debe minimizar las pérdidas por rotura, fuga o mal sellado. Las barreras plásticas semipermeables se emplean para proporcionar resistencia al paso de gases, vapores y olores (Schlimme y Rooney, 1993).

Un AM es un sistema dinámico en el que se presentan simultáneamente la permeación y la respiración. Las condiciones óptimas de un sistema de AM pueden determinarse por medio de modelos matemáticos.

4.6.1 Permeabilidad de los gases a través de películas plásticas

Como se mencionó anteriormente la permeabilidad de la película plástica es un factor crítico en el diseño de un EAM por esta razón es importante tener un

conocimiento profundo al respecto. Un gas o vapor se transmite a través de sólidos porosos obedeciendo a los procesos de solubilidad y mediante mecanismos de difusión. Cuando un gas está en contacto con una película, es absorbido y se solubiliza en ella. La solubilidad (S) describe la disolución de un gas en un polímero. La cantidad de gas absorbido se conoce como coeficiente de absorción y es un valor dependiente de la temperatura y de la presión parcial del gas (Paine y Paine, 1983).

La difusión (D) representa una propiedad del sistema polímero-permeante y describe el movimiento de las partículas permeantes a través del polímero (Miller y Krochta, 1997). La velocidad a la cual un gas atraviesa una película permeable depende de las propiedades específicas de la película, del gas y del grado de interacción entre la película y el gas (Miller y Krochta, 1997).

Las cadenas poliméricas de las películas están arregladas de tal manera que generan poros, de diferentes tamaño. La red polimérica será más o menos rígida dependiendo de la vibración de los átomos de las moléculas que la forman. Por lo tanto, membranas rígidas permitirán la permeabilidad de moléculas pequeñas, y las películas flexibles permitirán el paso de moléculas más grandes debido al movimiento de las moléculas en la red (Paine y Paine 1983).

En una barrera polimérica las cadenas se arreglan en redes quasi-cristalinas. Por encima del punto de transición vítrea, que establece la zona en la cual el arreglo cristalino se pierde para dar origen a una estructura amorfa, los poros estarán en continua formación-desaparición debido al movimiento térmico, la difusión de las moléculas ocurrirá por la existencia de gradientes de concentración. La energía de activación será entonces la energía necesaria para formar un poro que contrarresta las fuerzas que mantienen las cadenas juntas.

Una vez alcanzado el estado estacionario, en el cual la cantidad de gas permeante no cambia con el tiempo, la permeación o intercambio de moléculas internas por externas a través de la película se efectuará a una velocidad constante generándose una diferencia de presión entre los dos lados de la película, tal y como lo representa la figura 1. Bajo estas condiciones el fenómeno está descrito por la ley de Fick:

$$Q = -AtD \frac{dc}{dx} \quad (2)$$

En donde Q es la cantidad de gas que se difunde a través del área A de la película en el tiempo t, D es la constante de difusión, dc/dx es el gradiente de concentración que atraviesa la película con un espesor x (Emond et al., 1991; Gavara y Catalá, 2000).

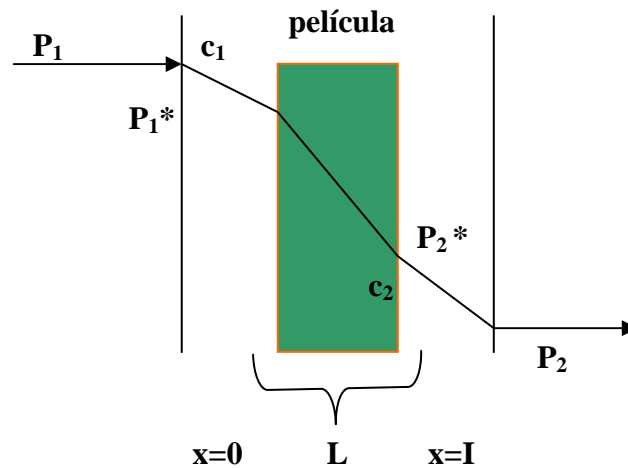


Figura 4.2. Transferencia de un gas a través de una película permeable en un régimen estacionario (Lozada, 2001).

Si integramos (2) obtenemos:

$$Q = - \frac{AtD}{L} (c_1 - c_2) \quad (3)$$

En donde c_1 y c_2 son las concentraciones de gas en las dos superficies de la película, L es el espesor de la película (Paine y Paine, 1983; Gavara y Catalá, 2000).

Las concentraciones de gas suelen expresarse en términos de su presión parcial (p) la cual se encuentra en equilibrio con la película. Por ello se suele expresar c como

el producto $S p$, en donde S es el coeficiente de solubilidad del gas en la película de acuerdo a la Ley de Henry. Sustituyendo en (3) obtenemos (Emond et al., 1991):

$$Q = - \frac{A t D S (p_1 - p_2)}{L} \quad (4)$$

La permeabilidad (P) se define como el producto de la difusión (D) y la solubilidad (S) (Paine y Paine, 1983):

$$P = D * S \quad (5)$$

Por lo que (5) se convierte en:

$$P = D * S = \frac{L Q}{A t (p_1 - p_2)} \quad (6)$$

La ecuación (6) se aplica a gases ideales, y para otros cuyas desviaciones de las leyes de los gases son pequeñas (Gavara y Catalá, 2000; Paine y Paine, 1983).

4.6.1.1 Factores que afectan la permeabilidad

Existe una gran cantidad de factores que afectan el fenómeno de permeabilidad. Se debe tener en cuenta que un material polimérico está formado por una red de cadenas macromoleculares y poros entre ellas. Estos poros pueden expandirse por acción térmica permitiendo el paso de la sustancia permeante a través del material, generando un gradiente difusional o una diferencia de presión. La difusión depende de la cantidad y del tamaño de los poros. Requiriéndose una energía de activación para que las moléculas atraviesen la membrana polimérica.

Naturaleza del polímero

El polímero es un factor importante en la difusión de un gas. Se debe considerar su estructura química, cristalinidad, tamaño de las cadenas, densidad, ramificaciones de las cadenas, peso molecular, grado de polimerización, enlaces dobles, aditivos, plastificantes, pigmentos y grado de reticulación (Pascat, 1986).

a) Estructura química

Los diferentes grupos funcionales en la estructura química de un polímero influyen en la solubilidad del gas permeante. Para cada grupo funcional en un polímero existe una diferente permeabilidad (Miller y Krochta, 1997).

b) Cristalinidad

La permeabilidad varía de manera inversa al grado de cristalinidad del polímero. Al aumentar la cristalinidad disminuye la difusión debido a que existe un camino más complejo que el gas debe atravesar, y porque se reduce el movimiento de las moléculas. La solubilidad se reduce porque hay menos porciones amorfas del polímero que participan en la disolución del gas permeante (Kumins, 1965; Miller y Krochta, 1997).

c) Densidad

El tamaño de las cadenas poliméricas determina la densidad y la cristalinidad del mismo. Disminuyendo la densidad se incrementa la permeabilidad (Pascat, 1986).

d) Orientación molecular

Un mayor grado de orientación molecular, por ejemplo, en polímeros cristalinos, disminuye de manera considerable la permeabilidad. En los materiales amorfos no se observa disminución significativa a la permeabilidad (Pascat, 1986). La tabla IX presenta el efecto de la orientación sobre la permeabilidad de tres películas poliméricas.

Tabla VIII. Efecto de la orientación en la permeabilidad al O₂ de diferentes polímeros a 23°C.

Polímero	Grado de orientación (%)	PO ₂ (ml mm/m ² día atm)
Polipropileno (PP)	0	57
	300	30
Poliestireno (PS)	0	160
	300	114
Poliéster (PET)	0	3.8
	500	1.9

Fuente: Pascat, 1986.

e) Dobles enlaces

La presencia de dobles enlaces incrementa de manera importante la permeabilidad de los polímeros (Pascat, 1986).

f) Simetría y polaridad

De dos polímeros con energías de activación difusional (E_D) comparables, aquel que tenga una estructura menos simétrica, tendrá una constante difusional (D°) más elevada para un gas a una temperatura determinada (Paine y Paine, 1983). La energía de activación del proceso difusional es una función de la cohesión del polímero (energía necesaria para separar los átomos y formar un poro).

Para dos polímeros con la misma simetría se observa que mientras mayor sea la polaridad, mayor será la energía de cohesión (E_D) y por lo tanto la difusión (D) será menor, al igual que la permeabilidad. Las fuerzas intermoleculares afectan el grado de libertad de los grupos en las cadenas poliméricas, siendo las estructuras con puentes de hidrógeno más fuertes que aquellas que poseen fuerzas de Van Der Waals (Pascat, 1986).

g) Aditivos y plastificantes

En muchas ocasiones a los materiales plásticos les son añadidos otros monómeros y/o polímeros, generalmente para incrementar la permeabilidad. La copolimerización puede disminuir las propiedades de barrera contra los gases permeantes si el copolímero posee mayor permeabilidad o genera un incremento en la elasticidad. Por otro lado, otros aditivos tienen otras funciones como la de retener agua en materiales hidrofílicos, este efecto genera plastificación del polímero, provocando un aumento en los poros por lo que el gas se difunde más rápido (Pascat, 1986). El uso de plastificantes para la elaboración de polímeros afecta la difusión de un gas disminuyendo el valor de E_D e incrementando el de D° (Paine y Paine, 1983).

h) Reticulación

La reticulación es la formación de puntos inter y/o intramoleculares entre las cadenas de un polímero. Un aumento en la cantidad de estos puntos conduce a una disminución en el valor de la difusión. La permeabilidad no es afectada de manera importante por la reticulación. Sin embargo, existe una ligera correspondencia en la disminución de la permeabilidad respecto al aumento en el grado de reticulación, afectando la difusión del gas y no su solubilidad en el polímero (Pascat, 1986).

4.6.2 Naturaleza del gas permeante

Existen algunos parámetros importantes que afectan la permeabilidad de un gas a través de una red polimérica concernientes a su naturaleza. El tamaño, la forma y su polaridad, junto con su facilidad de condensación afectan de manera importante su permeabilidad (Kumins, 1965; Manheim y Passy, 1985; Pascat, 1986; Paine y Paine, 1983).

a) Tamaño de la molécula

Generalmente la difusión y permeación disminuyen si el diámetro de la molécula que se difunde a través del empaque aumenta.

b) Forma de la molécula

Las moléculas lineales presentan mayor difusión y permeación. Una ligera variación en la forma de las moléculas causa diferencias importantes en su permeación (Pascat, 1986).

c) Polaridad

Las moléculas no polares se difunden a través de los materiales poliméricos no polares. Este fenómeno está directamente relacionado con la solubilidad de las moléculas en materiales que poseen polaridades similares (Pascat, 1986).

d) Condensación y solubilidad

La solubilidad generalmente depende de su compatibilidad con el polímero. La diferencia de permeabilidad que existe entre moléculas como N₂, O₂, CO₂ y vapor de agua se debe a su facilidad de condensación a una temperatura dada. Los vapores más solubles son aquellos que se condensan más fácilmente. Las permeabilidades de los gases, por lo tanto, dependerán de su temperatura y presión de condensación.

Otra constante física directamente relacionada con la solubilidad de los gases es su punto de ebullición. Mientras mayor sea el punto de ebullición, mayor será la permeabilidad del gas en cuestión (Pascat, 1986).

4.6.3 Temperatura

La dependencia de la permeabilidad con la temperatura se ha estudiado desde hace más de 50 años. En 1941 Barrer determinó que esta dependencia, tanto para materiales elásticos como no elásticos, sigue el modelo de Arrhenius:

$$P = P^{\circ} e^{-E_p/RT} \quad (7)$$

En donde P° es un factor independiente de la temperatura, E_p es la energía de activación a la permeabilidad del gas, R es la constante de los gases y T es la temperatura absoluta (Talasila y Cameron, 1997).

La linearización de la ecuación (7) da:

$$\ln P = E_p/RT + \ln P^\circ \quad (8)$$

Donde E_p/R es la pendiente de la línea recta (Paine y Paine, 1983).

Se sabe que la difusión D y la solubilidad S también siguen el modelo de Arrhenius (Paine y Paine, 1983):

$$D = D^\circ e^{-E_D/RT} \quad (9)$$

$$S = S^\circ e^{-E_S/RT} \quad (10)$$

4.6.4 Presión

Para los gases ideales, existe una proporcionalidad entre el coeficiente de transferencia (Q/At) y la diferencia de presión (Δp) entre las dos caras del polímero. Sin embargo, una vez alcanzado el equilibrio, la permeabilidad es independiente de la diferencia de presión (Pascat, 1986).

4.6.5 Espesor

La velocidad de transferencia es inversamente proporcional al espesor (l) de la película y es directamente proporcional al área de exposición (A) (Pascat, 1986).

4.6.6 Valores de permeabilidad al O₂ y CO₂ de películas plásticas semipermeables

Las películas más empleadas para AM de productos hortofrutícolas están hechas a partir de polímeros orgánicos de alto peso molecular (mayor a 106) que pueden tener otros aditivos como plastificantes (glicerol y ftalato de dimetoxietilo) y estabilizantes (cloro). Estas películas tienen un grosor menor a 0.254 mm y deben tener una flexibilidad adecuada y proteger al producto de agentes externos. Los polímeros más empleados en la elaboración de empaque para alimentos son los termoplásticos como el poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP), etileno-vinil acetato (EVA), nylon, polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de densidad media (MDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE). Muchos termoplásticos son derivados químicos del etileno (Lefaux y Truhaut, 1972; Kader et al., 1989; Schlimme y Rooney, 1993). En la tabla X se muestran valores de permeabilidad al O₂, CO₂ y H₂O de diferentes películas poliméricas a diferentes temperaturas.

Tabla IX. Permeabilidad a O₂, CO₂ y H₂O de películas poliméricas a diferentes temperaturas.

	Gas	T (° C)	P*10 ¹³ cm ³ cm/cm ² sPa
POLIOLEFINAS			
Polietileno de baja densidad (0.922 g/cm ³) LDPE	O ₂	25	5.18
	CO ₂	25	21
	H ₂ O	25	93
Polietileno de alta densidad (0.954 g/cm ³) HDPE	O ₂	25	0.825
	CO ₂	25	3.225
	H ₂ O	25	13.5
Polipropileno (0.907g/cm ³) PP 50 % cristalino	O ₂	30	1.7
	CO ₂	30	6.9
	H ₂ O	30	51
POLIESTIRENO			
Poliestireno PS	O ₂	25	1.9
	H ₂ O	25	1350

Poliestireno biaxialmente orientado PS	O ₂	25	2
	CO ₂	25	7.9
	H ₂ O	25	840

VINILPOLIMEROS

Polivinil alcohol	O ₂ (0% HR)	25	0.00665
	CO ₂ (0% HR)	25	0.00924
	CO ₂ (100% HR)	25	65
Copolimero vinil-alcohol –etileno (EVOH)	O ₂ (0% HR)	30	0.0000248
	O ₂ (40% HR)	30	0.0000743
	O ₂ (100% HR)	30	0.0181
Cloruro de Polivinilo PVC no plastificado	O ₂	25	0.034
	CO ₂	25	0.12
	H ₂ O	25	206

POLIESTERES

Poli(oxietileno tereftalato) PET amorfo	O ₂	25	0.0444
	CO ₂	25	0.227
Poli(oxietileno tereftalato) PET 40 % cristalino	O ₂	25	0.0257
	CO ₂	25	0.118

POLIAMIDAS

Poli(amino adipoliaminohexametileno)	O ₂ (40% HR)	30	0.013
Nylon 66	O ₂ (60% HR)	30	0.017
	O ₂ (100% HR)	30	0.026
Poli(amino – 1 – oxohexametileno)	O ₂	30	0.0285
Nylon 6	O ₂ (20% HR)	30	0.0218
	O ₂ (60% HR)	30	0.0305
	O ₂ (100% HR)	30	0.0435
	CO ₂	20	0.066
	H ₂ O	25	0.139

Piringer, (2000)

4.7 Velocidad de respiración (r) de frutas y hortalizas

4.7.1 Factores que afectan la velocidad de respiración de frutas y hortalizas

En un empaque, la respiración de un producto hortofrutícola está determinada por el tipo de producto, estado de madurez, condiciones físicas, concentraciones de O₂, CO₂ y C₂H₄ dentro del empaque, cantidad de producto dentro del empaque, temperatura y luz (Kader et al., 1989).

En general los productos hortofrutícolas no climatéricos tienen una alta velocidad respiratoria en las primeras etapas de desarrollo que disminuye de manera constante durante la maduración, por otro lado los productos climatéricos presentan valores de respiración altos al inicio de su desarrollo que disminuyen cuando el pico de respiración y producción de etileno que coincide con la maduración o senescencia ocurre (Lopez – Galvez et al., 1997).

Algunas veces un aumento en respiración durante el almacenamiento, después de un tiempo, puede ser causado por el deterioro debido a microorganismos; aunque los productos hortofrutícolas almacenados en AM son de corto tiempo de almacenamiento por lo que de acuerdo a Fonseca et al. (2002) la influencia del tiempo de almacenamiento debido a la senescencia así como los cambios climatéricos son insignificantes.

El factor externo más importante que afecta la respiración de frutas y hortalizas es la temperatura, ya que un aumento de 10 °C acelera al doble o triple las reacciones biológicas (Burzo, 1980; Zagory y Kader, 1988).

Respecto a la concentración de O₂, se ha asumido que la respiración disminuye si se reduce el O₂ disponible ya que con esto se reduce toda la actividad metabólica (Isenberg, 1979; Kader, 1987).

La inhibición respiratoria por CO₂ se ha explicado de diferentes maneras:

1. Ejerce un fuerte control en la actividad mitocondrial (Fonseca et al., 2002).
2. Afecta intermediarios y enzimas del ciclo de Krebs.
3. Inhibe la producción de etileno más que tener un efecto directo en el proceso de respiración (Fonseca et al., 2002).

Aunque también puede presentarse un incremento en la respiración de ciertos productos hortofrutícolas, lechuga por ejemplo, debido a daño del tejido por CO₂.

El cociente respiratorio (α) calculado como la relación de CO₂ producido/ O₂ consumido normalmente se asume igual a 1, aunque puede variar según el sustrato:

- Carbohidratos, $\alpha = 1$.
- Lípidos, $\alpha < 1$.
- Ácidos, $\alpha > 1$.
- Respiración anaeróbica, α es mucho mayor a 1.

Así en general los valores de α oscilan de 0.7 a 1.3 (Kader, 1987), Beaudry et al., (1992) reportaron un valor de α de 1.3 para mora azul considerando su contenido de ácido cítrico y azúcares.

Estudiando las AM, Beaudry (1993) observó un incremento en α de mora azul a las siguientes condiciones: altas concentraciones de CO₂, conforme la concentración de O₂ se acercaba a cero y cuando el “punto de rompimiento” (el punto más bajo de concentración de O₂ que no induce a anaerobiosis) de α se incrementaba con la temperatura. Beaudry et al., (1992) concluyó que el riesgo de anaerobiosis se incrementaba con la temperatura y el α para concentraciones de O₂ aerobias fue constante.

4.7.2 Métodos para determinar experimentalmente la velocidad de respiración de frutas y hortalizas

En el caso de AM se requiere tener un conocimiento preciso de las velocidades de consumo de O₂ (rO₂) y evolución de CO₂ (rCO₂) para poder calcular las concentraciones óptimas de dichos gases dentro del empaque, existen tres métodos para medir experimentalmente la velocidad de respiración que son descritos ampliamente por Fonseca et al.(2002):

1. **El sistema estático o cerrado.** En este caso un contenedor de sello hermético de volumen conocido es llenado con el producto y cerrado, quedando con una composición gaseosa interna igual a la atmosférica. Se miden los cambios en concentración de O₂ y CO₂ durante un cierto tiempo y estos se usan para estimar la velocidad de respiración usando las siguientes ecuaciones:

$$rO_2 = \frac{(O_2)_{in} - (O_2)_f * V}{(100 * M * (t_f - t_{in}))} \quad (11)$$

$$rCO_2 = \frac{((CO_2)_{in} - (CO_2)_f) * V}{(100 * M * (t_f - t_{in}))} \quad (12)$$

Donde (O₂)_{in} y (CO₂)_{in} son las concentraciones iniciales de O₂ y CO₂; (O₂)_f y (CO₂)_f son las concentraciones finales de O₂ y CO₂; V es el volumen libre en el contenedor; M es la masa del producto; *(t_f - t_{in}) es la diferencia entre el tiempo final y el inicial; se divide entre 100 porque las concentraciones están en % .

Entre sus limitantes se encuentra que es difícil estimar con exactitud el volumen libre del contenedor, que el aumento en la concentración de CO₂ y disminución de O₂ puede afectar la velocidad de respiración del producto, y que no se puede determinar la respiración para una mezcla de gases.

2. **El sistema con flujo.** En este sistema el producto se coloca en un contenedor impermeable a través del cual fluye una mezcla de gases a velocidad constante y la velocidad de respiración se calcula de la diferencia absoluta en la concentración de gas a la entrada y a la salida cuando el sistema alcanza el estado estacionario, usando las siguientes ecuaciones:

$$r_{O_2} = \frac{((O_2)_i - (O_2)_o) * F}{(100 * M)} \quad (13)$$

$$r_{CO_2} = \frac{((CO_2)_o - (CO_2)_i) * F}{(100 * M)} \quad (14)$$

Donde $(O_2)_i$ y $(CO_2)_i$ son las concentraciones a la entrada de O_2 y CO_2 ; $(O_2)_o$ y $(CO_2)_o$ son las concentraciones a la salida de O_2 y CO_2 ; F en m^3/seg es el flujo y M es la masa de producto usada.

En este método es difícil determinar el flujo y éste debe ser cuidadosamente elegido para poder medir con exactitud la diferencia en concentraciones del gas, además este método no es exacto en el caso de bajas velocidades de respiración.

3. **El sistema permeable.** Un empaque de dimensiones y permeabilidad de película conocidas es llenado con producto y se calculan las concentraciones de O_2 y CO_2 al estado estacionario y se realiza un balance de masa para estimar la velocidad de respiración con las ecuaciones (15) y (16):

$$r_{O_2} = \frac{P_{O_2} * A * ((O_2)_e - (O_2)_i)}{(100 * L * M)} \quad (15)$$

$$r_{CO_2} = \frac{P_{CO_2} * A * ((O_2)_i - (O_2)_e)}{(100 * L * M)} \quad (16)$$

Donde P_{O_2} y P_{CO_2} son los coeficientes de permeabilidad para O_2 y CO_2 respectivamente; A es el área superficial; L es el grosor de la película; M es la masa del producto. Este es el método menos exacto ya que existen más variables que en los otros

dos como las dimensiones y permeabilidad del empaque, es más difícil medir el volumen libre y se requiere más tiempo para alcanzar el equilibrio (Fonseca et al., 2002).

4.7.3 Efecto de la temperatura

Para efectos de la distribución y venta, temperaturas bajas (0 – 25°C) son efectivas para disminuir las reacciones bioquímicas excepto en los productos sensibles a las bajas temperaturas como aguacate, plátano, chirimoya, uva, mango, papaya, piña, pepino y tomate entre otros (Fonseca et al., 2002).

El factor Q₁₀ o coeficiente de temperatura indica el aumento en la velocidad de respiración por cada aumento de 10 °C en la temperatura y así mismo por cada reducción de 10 °C la velocidad de respiración disminuye de manera similar, la ecuación que lo expresa es (Wiley, 1994; Fonseca et al., 2002)

$$Q_{10} = (r_2/r_1)^{10 / (T_2 - T_1)} \quad (17)$$

Donde r_1 y r_2 son la velocidad de respiración a la temperatura T_1 y T_2 respectivamente, los valores de Q₁₀ varían de 1 a 4 según el rango de temperaturas por ejemplo para mora azul, Emond et al.(1993) reportaron valores de Q₁₀ de 2.8 a 3.2.

La influencia de la temperatura en la velocidad de respiración también ha sido cuantificada satisfactoriamente con la ecuación de Arrhenius

$$r = r^{\circ} * e^{-E_r/RT} \quad (18)$$

Donde r° es un parámetro del modelo, E_r es la energía de activación (Pa m³/mol), R es la constante universal de los gases (Pa m³/mol K) y T es la temperatura (°C o K) (Fonseca et al., 2002).

Los valores de energía de activación para frutas y hortalizas en una atmósfera normal (aire) se encuentran entre 29 y 92.9 kJ/mol (Exama et al., 1993).

4.8 Modelado de la transferencia de gases en un AM

La respiración de frutos y vegetales es un proceso que se puede resumir por la ecuación (19) y que hace referencia a la oxidación de la glucosa (Mannapperuma y Singh, 1994; Yam y Lee, 1994; Song, 2002) y se esquematiza en la figura 3.2:

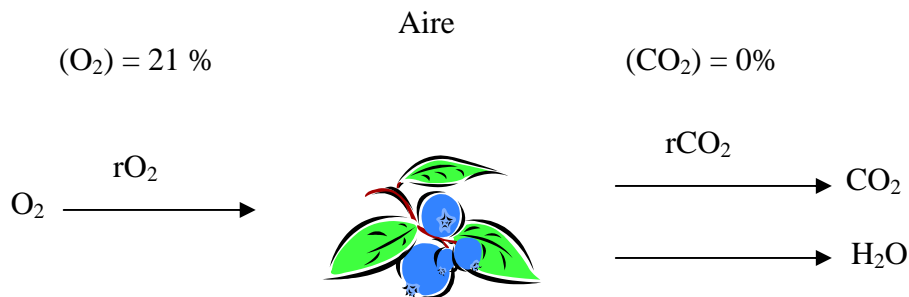


Figura 4.3 Proceso de respiración de frutas frescas bajo condiciones ambientales.

Una AM se obtiene mediante el uso de una película que modifica las concentraciones de O₂ y CO₂ en el interior del empaque. La mayoría de AM emplea altas concentraciones de CO₂ y bajas concentraciones de O₂ con relación a las concentraciones ambientales. Los gradientes generados provocan un flujo de O₂ hacia el interior del empaque y un flujo de CO₂ hacia el exterior (Kader et al., 1989). El empackado en AM es un sistema dinámico en el cual la concentración interna de los gases cambia continuamente hasta alcanzar el estado estacionario (Solomos, 1994).

El interés por modelar la transferencia de gases en los empaque es porque se desea simular las concentraciones de equilibrio de O₂ y de CO₂ que se alcanzan en el

interior del empaque ya que si no tendría que hacerse por prueba y error. El desarrollo de modelos matemáticos se basa en balances de masa del O₂ y del CO₂ que describen la evolución del porcentaje de estos dos gases en función del tiempo. Esta evolución depende de la permeabilidad del empaque, de la intensidad de respiración del producto y de las condiciones ambientales.

El balance global de masa establece la siguiente igualdad:

$$\begin{aligned} & \text{(Tasa de acumulación de O}_2 \text{ o de CO}_2 \text{ en el empaque)} \\ & \qquad = \\ & \text{(Tasa de permeación de O}_2 \text{ o de CO}_2 \text{ a través del empaque)} \\ & \qquad + \\ & \text{(Tasa de consumo de O}_2 \text{ o de producción de CO}_2 \text{ debida a la respiración)} \end{aligned}$$

Para determinar la concentración de los gases dentro de un empaque en atmósfera modificada Zagory y Kader (1988) mencionan que es importante considerar:

- La velocidad de respiración del alimento, la composición de los gases y la temperatura pueden cambiar con el tiempo.
- Los alimentos pierden o ganan peso por efecto de la respiración y el intercambio de agua con el ambiente.
- Los cambios en concentración de gases y temperatura pueden afectar el volumen libre del envase.
- La permeabilidad de la película depende de la humedad relativa y temperatura del ambiente.

Las ecuaciones del balance para O₂ y CO₂ son:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = 100 \left(\frac{P_{O_2} * A * (0.21 - (O_2)_i / 100)}{V * L} - \frac{(M * r_{O_2})}{V} \right) \quad (20)$$

$$\frac{d(CO_2)}{dt} = 100 \left(\frac{P_{CO_2} * A * (0 - (CO_2)_i / 100)}{V * L} + \frac{(M * r_{CO_2})}{V} \right) \quad (21)$$

Donde (O₂) y (CO₂) son las concentraciones de los gases (%), P_{O₂} y P_{CO₂} son las permeabilidades al O₂ y CO₂ respectivamente (ml cm /cm² h atm), A es el área de la película (cm²), r_{O₂} y r_{CO₂} son las velocidades de consumo de O₂ y producción de CO₂ (ml/kg h), M es el peso del producto (Kg), L es el espesor de la película (cm) y V es el volumen libre en el empaque (cm³) (Lee et al. 1991). Estas ecuaciones describen la variación de las concentraciones de O₂ y de CO₂ de una AM en régimen no estacionario, y con ellas se puede modelar la evolución de los gases en una atmósfera interna de volumen conocido en función de la velocidad de respiración y la permeabilidad de los gases (Mannapperuma y Singh, 1994).

El diseño de un AM debe efectuarse basado en el estado de equilibrio del empaque y el producto almacenado. Sin embargo, el empaque alcanza las condiciones adecuadas hasta después de un tiempo determinado que puede ser de unas horas hasta unos días. El modelo dinámico de un empaque debe tomar en cuenta el volumen libre dentro del empaque, el cual está directamente relacionada con el tiempo en que se alcanza el estado estacionario. De acuerdo a Mannapperuma y Singh (1994) a más pequeño es el volumen interno y las concentraciones de los gases son lo más parecida a las del estado estacionario (aprox. 3% en O₂ y 5% en CO₂), el tiempo en el que se alcanzan las concentraciones de equilibrio para una AM es menor.

Entonces cuando el sistema alcanza el régimen estacionario, los términos d(O₂)/dt y d(CO₂)/dt se hacen cero, en el exterior del empaque la concentración de O₂ (O₂)_e = 0.21 atm y la de CO₂ (CO₂)_e = 0 atm, ya que lo ideal es que la concentración de gases interna sea la óptima para el producto empacado (O₂)_i, (CO₂)_i se convierten en (O₂)_o, (CO₂)_o, entonces las ecuaciones (20) y (21) se reducen a:

$$M \cdot r_{O_2} = \frac{P_{O_2} \cdot A \cdot ((O_2)_e - (O_2)_o)}{L} \quad (22)$$

$$M \cdot r_{CO_2} = \frac{P_{CO_2} \cdot A \cdot ((CO_2)_o - (CO_2)_e)}{L} \quad (23)$$

Las ecuaciones 22 y 23 describen el equilibrio del sistema: la tasa de producción de CO_2 es igual a la tasa de CO_2 que se difunde por permeación a través de la película y la tasa de consumo de O_2 es igual a la tasa de O_2 que entra a través de la película, respectivamente.

A partir de un rearrreglo de las ecuaciones 22 y 23 se obtiene la permeabilidad requerida para obtener la concentración óptima de O_2 y CO_2 respectivamente (ecuaciones 24 y 25):

$$P_{O_2} = \frac{M \cdot r_{O_2} \cdot L}{A \cdot ((O_2)_e - (O_2)_o)} \quad (24)$$

$$P_{CO_2} = \frac{M \cdot r_{CO_2} \cdot L}{A \cdot ((CO_2)_e - (CO_2)_o)} \quad (25)$$

Combinando la permeabilidad de las películas y las velocidades de respiración, se obtiene la siguiente ecuación (Exama et al., 1993; Mannapperuma et al., 1989):

$$\beta = \alpha \cdot ((O_2)_e - (O_2)_o) / ((CO_2)_o - (CO_2)_e) \quad (26)$$

Donde $\beta = P_{CO_2} / P_{O_2}$ es el coeficiente de permeabilidades o selectividad de la película y $\alpha = r_{CO_2} / r_{O_2}$ es el coeficiente o cociente respiratorio.

En un AM existe un balance adecuado entre la respiración de un vegetal y la permeabilidad de la película al O_2 y al CO_2 , Del Valle y Palma (2002) presentan un gráfico (figura 3.3) de la concentración de O_2 en el eje de la abscisa contra la de CO_2 en el eje de la ordenada en el cual se representan las composiciones gaseosas recomendadas para cada producto almacenado bajo AM o AC, una película cuyos valores de permeabilidad a O_2 (P_{O_2}) y CO_2 (P_{CO_2}) tengan una relación lineal con pendiente igual a P_{CO_2} / P_{O_2} (β) que atravesase los valores de concentración en los

cuales un vegetal se pueda almacenar de manera óptima, podrá ser empleada como empaque de dicho producto (Lozada, 2001).

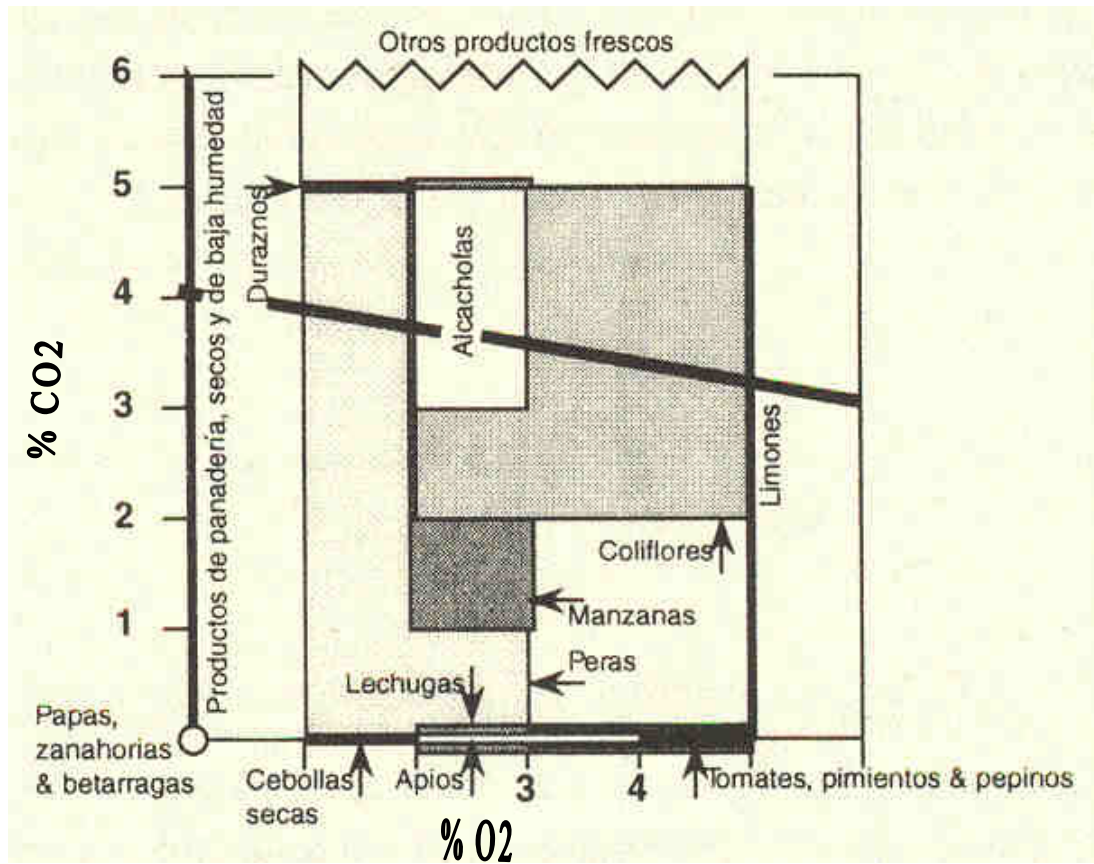


Figura 4.4. Concentraciones de O₂ y CO₂ recomendadas para EAM y EAC (Del Valle y Palma, 2002).

Las películas poliméricas tienen permeabilidades a los gases muy variadas, sin embargo, la β de la mayoría de estas películas varía en un intervalo muy estrecho (4 a 6).

Rearreglando la ecuación 26 como ecuación lineal se puede estimar la concentración de CO₂ al equilibrio:

$$(CO_2)_o = (CO_2)_e - \frac{\alpha}{\beta} (O_2)_o + \frac{\alpha}{\beta} (O_2)_e \quad (27)$$

Cuando β tiene un valor numérico, por ejemplo 5, la ecuación 27 genera una pendiente de 1/5 (LDPE) en una gráfica de $(CO_2)_o$ contra $(O_2)_o$, Este hecho implica que únicamente el EAM cuyos valores estén dentro de esta línea pueden generar la atmósfera adecuada para este producto (Exama et al., 1993; Mannapperuma y Singh, 1994).

Considerando que la velocidad de producción de CO_2 (RCO_2) es igual a la velocidad de consumo de O_2 (RO_2), el valor de α será igual a 1. De esta manera la ecuación 27 se convierte en la ecuación 28:

$$(CO_2)_o = \frac{0.21}{\beta} - \frac{(O_2)_o}{\beta} \quad (28)$$

Con esta ecuación es posible determinar la selectividad β de la película, necesaria para la conservación de un vegetal en particular o de evaluar la aplicabilidad de una película en un producto específico (Yam y Lee, 1995).

Ya que se seleccionó una película plástica se debe determinar su tamaño y espesor, esto es posible usando la ecuación 29:

$$\frac{M * L}{A} = \frac{(O_2)_e - (O_2)_o}{r_{O_2} / P_{O_2}} \quad (29)$$

Como ya se mencionó anteriormente, la temperatura es uno de los factores importantes en un sistema de EAM, su efecto sobre la respiración y la permeabilidad a los gases de las películas se describe por la ley de Arrhenius:

$$r_{CO_2,O_2} = r_{CO_2,O_2}^o e^{-E_{rCO_2,O_2} / (R * (T-T_o))} \quad (30)$$

$$P_{CO_2,O_2} = P_{CO_2,O_2}^o e^{-E_{P_{CO_2,O_2}} / (R * (T-T_o))} \quad (31)$$

Donde r° y P° son las constantes de intensidad de respiración y permeabilidad, E_r y E_p son las energías de activación de respiración (kcal/mol), R es la constante de los gases (8.314×10^{-3} kJ/mol K o 1.982×10^{-3} kcal/mol K), T es la temperatura (K) y T_0 la temperatura de referencia (K). Combinando ambas ecuaciones (30 y 31) se obtiene la tasa entre la velocidad de consumo de O_2 del alimento y la permeabilidad de O_2 del envase a una temperatura absoluta (T) y una temperatura absoluta de referencia (T_0):

$$\frac{r_{O_2}}{P_{O_2}} = \frac{r^{\circ}_{O_2}}{P^{\circ}_{O_2}} e^{-\Delta E_{O_2} / (R * (T - T_0))} \quad (32)$$

Este conjunto de ecuaciones constituye el fundamento de la modelación de la interacción entre el empaque y los productos que respiran.

4.8.1 Modelación de la velocidad de respiración de frutas y hortalizas

Debido a que es difícil modelar el proceso respiratorio considerando todos los factores que intervienen en las reacciones enzimáticas, se han desarrollado modelos empíricos para cada producto hortofrutícola como una función de las variables controlables, es común en la modelación de AM se considere la velocidad de respiración constante aunque esto es solamente un modelo simplificado (Fonseca et al., 2002).

Se han realizado trabajos para expresar matemáticamente el cociente de respiración ($\alpha = r_{O_2}/r_{CO_2}$), entre estos trabajos se puede citar a Henig y Gilbert (1975) quienes supusieron que α dependía linealmente de la concentración de O_2 a concentraciones menores de 11% y que era constante a concentraciones superiores. Hayakawa et al. (1975) modificaron el modelo propuesto por Henig y Gilbert (1975) y expresaron α en función de las concentraciones de CO_2 y O_2 . Cameron et al. (1989) obtuvieron una expresión exponencial para expresar la tasa de consumo de O_2 de

tomates. Todos estos enfoque empíricos tienen, sin embargo, una aplicación limitada (Lozada, 2001).

La primera ecuación para modelar la respiración aerobia de productos frescos, basada en fundamentos teóricos, fue propuesta por Lee et al. (1991) donde la respiración de frutas y hortalizas se modela siguiendo el principio de cinética enzimática usando una ecuación tipo Michaelis – Menten, que también ha sido usada para describir la velocidad de respiración de microorganismos en procesos de fermentación aeróbica industrial.

Este modelo plantea que en ausencia de CO₂ la velocidad de respiración depende de la concentración de O₂ y la describe con la ecuación 33.

$$r = \frac{V_m * (O_2)}{K_m + (O_2)} \quad (33)$$

Por otro lado la dependencia de la respiración respecto a CO₂ se basa en un modelo de inhibición no competitiva, que se usa para describir la inhibición del producto en reacciones donde intervienen múltiples sustratos y productos (Lee et al., 1991) (ecuación 34).

$$r = \frac{V_m * (O_2)}{K_m + (1 + (CO_2) / K_i) * (O_2)} \quad (34)$$

La nomenclatura utilizada en las ecuaciones 25 y 26 es la siguiente:

(O₂) y (CO₂) son las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono (%), V_m es la velocidad de respiración máxima (ml /kg h o mg /kg h), K_m es la constante de Michaelis – Menten (% O₂) y K_i es la constante de inhibición (% CO₂).

Este modelo es ampliamente usado para modelar la respiración aeróbica de frutas y hortalizas, y no aplica para respiración anaeróbica.

Fonseca et al. (2002) hace una revisión de los modelos que describen la velocidad de respiración de frutas y hortalizas y los condensa en una tabla donde

presenta la referencia, el producto en el cual se probó, el método experimental empleado, las atmósferas usadas, la temperatura, el modelo, sus ecuaciones correspondientes y la calidad del ajuste basándose en visualización gráfica; en la tabla X se presentan los modelos más utilizados.

Tabla X. Modelos de respiración aerobia en frutas y hortalizas

Modelo	Producto	Composición atmósfera	T (°C)	Autores
Lineal	Jitomate	4 –21% O ₂ , 0 – 21% CO ₂	23	Henig y Gilbert (1975)
	Mango	2.5 – 20% O ₂	ambiente	Fishman et al. (1996)
Polinomial	Jitomate	5–20% O ₂ , 0–20 % CO ₂	21	Yang y Chinnan (1988)
	Jitomate	1 – 21% O ₂	20	Gong y Corey (1994)
Exponencial	Jitomate	0-21% O ₂ , 0% CO ₂	25	Cameron et al. (1989)
	Mora azul	1-18 kPa O ₂	0 -25	Beaudry et al. (1992)
	Lechuga cortada	21 kPa O ₂ , 0 CO ₂	5	Smyth et al. (1998)
Michaelis – Menten	Manzana	1.9-28.4 kPa O ₂ , 0 CO ₂	20.5	Andrich et al. (1991)
	Brócoli cortado, manzana, plátano, jitomate	De datos tomados de otros autores	Varias	Lee et al. (1991)
	Hongos	0.81-20.6% O ₂ , 0.18-9.7% CO ₂	8, 18	Peppelenbos et al. (1993)
	Brócoli cortado	0-16kPa O ₂	0	Talasila et al. (1994)
	Manzana	0-20 kPa O ₂	20	Dadzie et al. (1996)
	Lechuga cortada	0-6 kPa O ₂	5, 10	Smyth et al. (1998)
	Ensalada de col	2-10% O ₂ , 0 % CO ₂	5	McLaughlin y O’Beirne (1999)

Michaelis-Menten - inhibición no competitiva de CO ₂	Esparrago, manzana, brócoli	De datos tomados de otros autores	Varias	Lee et al. (1991)
	Brócoli cortado	1-21% O ₂ , 0-15 % CO ₂	0-24	Hagggar et al. (1992)
	Mora azul	15-21% O ₂ , 0-20 % CO ₂	5,15,25	Song et al. (1992)
	Ensalada de col	21% O ₂ , 0-25 % CO ₂	5	McLaughlin y O'Beirne (1999)
Multiexponencia	Mora azul	2-16 kPa O ₂ , 5- 60 kPa CO ₂	15	Beaudry (1993)
Michaelis-Menten y exponencial	Mora azul	De datos de Beaudry et al. (1992)		Cameron et al. (1994)
Michaelis- Menten y Arrhenius	Coliflor	0-300 mg O ₂	1, 6.5, 12.23	Ratti et al. (1996)
	Plátano	No especificado	10-30	Maneerat et al. (1997)
	Manzana	0-21kPa O ₂ , 0 kPa CO ₂	1-21	Andrich et al. (1998)
Teoría de adsorción de Langmuir	Lechuga picada, jitomate, brócoli, manzana, platano, mora azul	De datos tomados de otros autores	Varias	Makino et al. (1996)
Cuatro tipos de inhibición de CO ₂ en ecuaciones tipo Michaelis – Menten	Manzana, esparrago, brócoli, jitomate	Varias	Varias	Peppelenbos y Leven (1996)

Modificado de Fonseca et al. (2002)

Labuza y Breene (1989) proponen la ecuación 35 y 36 para describir la velocidad de penetración de O₂ y CO₂ en el empaque bajo atmósfera modificada y la ecuación 37 como una aproximación lineal de la respiración.

$$r_{O_2} = (P_{O_2}) * (A/L) * (0.21 - P_{int}) \quad (35)$$

$$r_{CO_2} = P_{CO_2} (A/L) (P_{int} - 0) \quad (36)$$

Donde

r_{O_2}, r_{CO_2} = vel de permeación (mg O₂ o CO₂/s)

P_{O_2}, P_{CO_2} = permeabilidad (mg O₂ o CO₂ cm/ s cm² atm)

A = area de película (cm²)

L = espesor de película (cm)

P_{int} = presión parcial de O₂ dentro del empaque

$$Rr = B * M * P_{in} \quad (37)$$

Donde

Rr = velocidad de respiración (cc O₂/día)

B = constante (cc O₂ atm / g día)

M = gramos de producto

P_{in} = presión de oxígeno dentro del empaque (atm)

Combinando las dos ecuaciones, es decir igualándolas, se puede encontrar la concentración de O₂ en estado estacionario, donde la acumulación es cero (ecuación 38).

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{((B * M) / (P_{O_2} * (A/L)) + 1)} \quad (38)$$

Graficamente se observa en la figura 3.4.

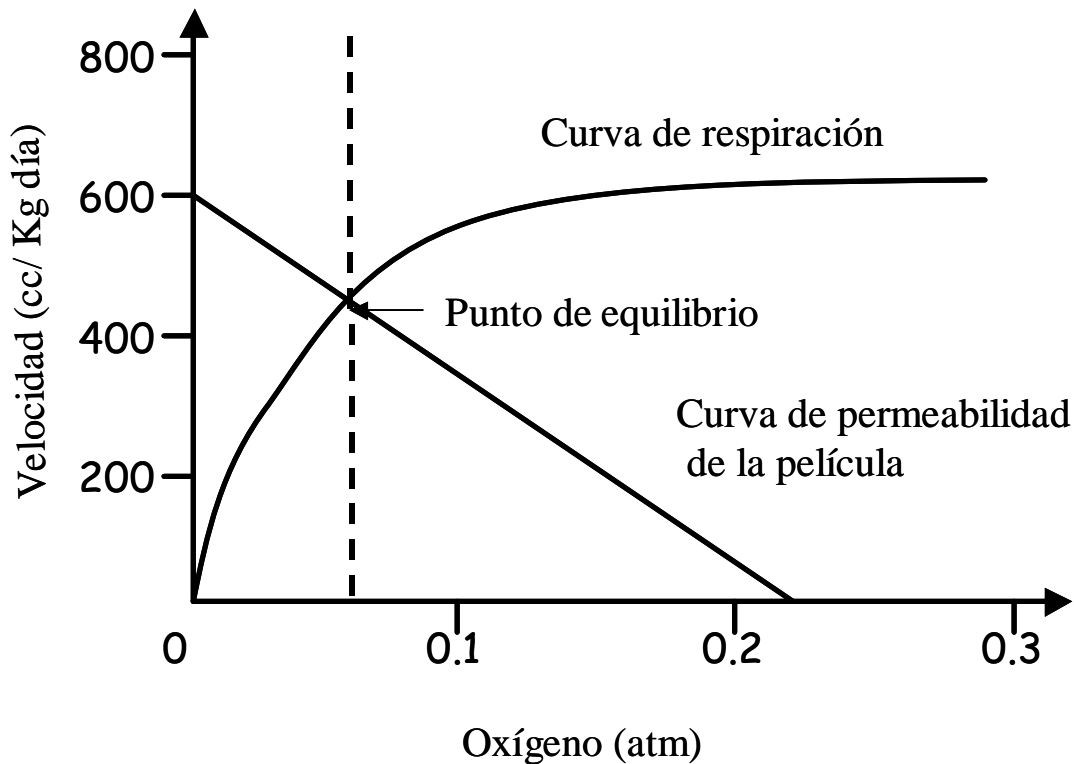


Figura 4.5. Punto de equilibrio entre el flujo de oxígeno a través de una película plástica y el consumo de oxígeno por respiración de la fruta (Labuza y Breene, 1989).

Hagger et al. (1992) propone un modelo de respiración basado en cinética enzimática tipo Michaelis – Menten y el método de sistema cerrado para generar curvas de respiración de frutas y hortalizas, Song et al. (1992) usa este mismo modelo para predecir el comportamiento de los productos dentro de empaques semipermeables. En ambos trabajos el ajuste del modelo resulta ser bueno para los productos probados.

Este planteamiento describe los cambios en concentración de O_2 y CO_2 en función del tiempo con las siguientes ecuaciones (39 y 40) obtenidas a partir de un análisis de regresión no lineal usando KaleidaGraph TM.

$$(O_2) = 21 - \frac{t}{(A_1 * t + B_1)^{C_1}} \quad (39)$$

$$(CO_2) = \frac{t}{(A_2 * t + B_2)^{C_2}} \quad (40)$$

Donde

(O_2) , (CO_2) = concentraciones de oxígeno y bióxido de carbono (%)

t = tiempo (h)

A,B,C = son valores constantes

Las velocidades de respiración (consumo de O_2 y producción de CO_2) de acuerdo al tiempo se calculan sustituyendo las derivadas de las ecuaciones 39 y 40 (ecuaciones 41 y 42) en las ecuaciones 43 y 44 respectivamente.

$$\frac{d(O_2)}{dt} = A_1 * C_1 * t * (A_1 * t + B_1)^{(-1-C_1)} - (A_1 * t + B_1)^{(-C_1)} \quad (41)$$

$$\frac{d(CO_2)}{dt} = - A_2 * C_2 * t * (A_2 * t + B_2)^{(-1-C_2)} + (A_2 * t + B_2)^{(-C_2)} \quad (42)$$

$$r_{O_2} = \frac{-d(O_2)}{dt} * \frac{(M_{O_2} * P * V)}{(100 * R * M * T)} \quad (43)$$

$$r_{CO_2} = \frac{d(CO_2)}{dt} * \frac{(M_{CO_2} * P * V)}{(100 * R * M * T)} \quad (44)$$

Donde

r_{O_2} y r_{CO_2} = velocidad de consumo de O_2 y producción de CO_2 respectivamente (mg/kg h)

M_{O_2} y M_{CO_2} = peso molecular de O_2 y CO_2 (kg /mol)

P = presión (Pa)

V = volumen libre (ml)

R = constante de los gases (6. 236e⁴ ml mmHg / mol K o 8.314 J/mol K)

M = peso del producto (kg)

T = temperatura (K)

Posteriormente a partir de las velocidades de respiración calculadas con las ecuaciones 43 y 44 se estiman los parámetros de la ecuación de Michaelis – Menten (ecuación 34) usando una regresión lineal múltiple (IMSL subrutina RGIVN, IMSL, inc., Houston, TX). Una vez obtenidos los parámetros de respiración, la concentración de gases en función del tiempo en empaques semipermeables se calcula con las siguientes ecuaciones (45 y 46).

$$\frac{d(O_2)}{dt} = \frac{(100 \cdot R \cdot T)}{(M_{O_2} \cdot V \cdot P)} * \frac{(A \cdot P_{O_2} (0.21 - (O_2)/100))}{L} - M \cdot r_{O_2} \quad (45)$$

$$\frac{d(CO_2)}{dt} = \frac{(100 \cdot R \cdot T)}{(M_{CO_2} \cdot V \cdot P)} * \frac{(A \cdot P_{CO_2} (0.0 - (CO_2)/100))}{L} + M \cdot r_{CO_2} \quad (46)$$

Donde

A= superficie del empaque (cm²)

P_{O₂} y P_{CO₂} = permeabilidad al oxígeno y al dióxido de carbono de la película (mg cm/cm² s atm)

L = espesor de la película semipermeable (cm)

Mahajan et al. (2004) presentan un software llamado PACK in MAP para el diseño de empaques en atmósfera modificada de productos frescos enteros y cortados, las características son

- Es un software amigable con el usuario que usa una interfase gráfica construida en Matlab 6.5.
- Simula el cambio en concentración de O₂ y CO₂ en el espacio de cabeza de los empaques a diferentes películas poliméricas, geometría, área, peso de producto y condiciones ambientales.
- Puede seleccionar la película polimérica ideal y definir la cantidad de producto o el área de película para el intercambio de gases.
- Tiene dos bases de datos:
 - Atmósferas ideales para 38 productos.
 - 75 modelos de velocidad de respiración.

- Datos de permeabilidad para 27 películas poliméricas
- Incluye simulación de empaques mediados por perforaciones y empaques con películas macro-perforadas.

Las ecuaciones de diseño parten del balance de masa diferencial de los gases, ecuaciones 20 y 21 pero sin incluir el grosor de la película (L), estas se acoplan a los modelos que describen la respiración en función de la concentración de gases, temperatura (Michaelis-Menten, Arrhenius) y a los modelos que describen la permeabilidad del material de empaque en función de la temperatura.

El software considera tres tipos de sistemas:

1. Películas poliméricas sin perforaciones o microperforadas.
2. Películas poliméricas macroperforadas.
3. Empaques mediados por perforaciones.

La permeabilidad de las películas macroscópicas (P_{mO_2} y P_{mCO_2}) es cuantificada con las siguientes ecuaciones ya que dichas perforaciones representan una ruta paralela para el intercambio de gases

$$P_{mO_2} = P_{O_2} + \frac{\pi * R_H^2 * 16.4 \times 10^{-6} * N_H}{e + R_H} \quad (47)$$

$$P_{mCO_2} = P_{CO_2} + \frac{\pi * R_H^2 * 20.6 \times 10^{-6} * N_H}{e + R_H} \quad (48)$$

Donde

R_H = radio de la perforación

e = espesor de la película

N_H = número de perforaciones

El intercambio de gases en películas mediadas por perforaciones es independiente de la temperatura pero depende de la porosidad y las dimensiones del tubo y lo describen con las siguientes ecuaciones

$$PO_2 = 4.8 \times 10^{-6} Np \cdot \varepsilon \cdot \frac{D^{1.45}}{Lp^{0.598}} \quad (49)$$

$$PCO_2 = 3.89 \times 10^{-6} Np \cdot \varepsilon \cdot \frac{D^{1.45}}{Lp^{0.598}} \quad (50)$$

Donde
 Np = número de tubos

Mahajan et al. (2004) consideran 14 las variables de diseño envueltas en un diseño de EAM (tabla XI) de estas el usuario define el tipo de producto, las condiciones ambientales, la cantidad de producto a empacar y el tamaño y geometría del empaque (bolsa, charola o contenedor cilíndrico). El software selecciona a partir de esta información la composición de gas deseada dentro del empaque, calcula la velocidad de respiración y el volumen del espacio de cabeza.

Tabla XI Variables involucradas en el diseño de EAM

	Variables	Nomenclatura
Relacionadas con el ambiente	Concentración de gases Temperatura	(O ₂) _e , (CO ₂) _e T
Relacionado con el producto	Masa del producto Densidad del producto Velocidad de respiración Composición de gas deseada	M ρ rO ₂ , rCO ₂ (O ₂) _o , (CO ₂) _o
Relacionadas con el empaque	Volumen Area de intercambio de gases (o número de perforaciones en un empaque mediado por perforaciones) Permeabilidad a gases	V A (Np) PO ₂ , PCO ₂

Posteriormente el software selecciona la mejor película polimérica y otras posibles a través del análisis del balance de masa en estado estacionario (ecuación 27), para asegurar que el material de empaque alcanza la composición gaseosa deseada en estado estacionario calcula los valores máximo y mínimo de β con las siguientes ecuaciones

$$\beta^{\min} = \alpha_{\max} * \frac{((O_2)_e - (O_2)_{\max})}{(CO_2)_{\max} - (CO_2)_e} \quad (51)$$

$$\beta^{\max} = \alpha_{\min} * \frac{((O_2)_e - (O_2)_{\min})}{(CO_2)_{\min} - (CO_2)_e} \quad (52)$$

Donde

Los subíndices min y max representan los niveles mínimo y máximo de O₂ y CO₂ en el rango seleccionado por el software.

Después de hacer el cálculo el software lista las películas poliméricas con $\beta^{\min} < \beta < \beta^{\max}$ y selecciona la película cuyo valor de β es cercano al valor promedio.

También el usuario puede seleccionar la película y el software simula el cambio en concentración de O₂ y CO₂ con el tiempo usando una rutina de optimización de Matlab (fsolve), resuelve las ecuaciones 20 y 21 combinadas con los modelos que describen la velocidad de respiración y la permeabilidad de la película. El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio lo calcula como el tiempo requerido para asegurar que la desviación entre las concentraciones de O₂ y CO₂ y sus valores de equilibrio es menor al 5%.

Para calcular el área necesaria para el intercambio de gases, o si se tiene el área se puede calcular la cantidad de producto empacado el software sigue estos pasos

- Calcula la composición promedio de O₂ y CO₂ en el rango recomendado y velocidad de respiración respectiva.
- Calcula la pendiente (S_f) de la línea que representa la relación de O₂ y CO₂ al equilibrio para la película seleccionada.

$$S_f = - \alpha^{\text{promedio}} / \beta \quad (53)$$

- Calcula la pendiente (S_N) de la línea que cruza la composición de gas promedio y es perpendicular a la línea anterior (S_f).

$$S_N = \beta / \alpha^{\text{prom}} \quad (54)$$

- Calcula el intercepto (I_f) de la línea de pendiente S_f .

$$I_f = (CO_2)_e + \frac{\alpha^{prom} * (O_2)_e}{\beta} \quad (55)$$

- Calcula el intercepto (I_N) de la línea de pendiente S_N .

$$I_N = (CO_2)_{prom} - \frac{\beta}{\alpha^{prom}} * (O_2)_{prom} \quad (56)$$

- Calcula las coordenadas del punto donde las dos líneas (S_f y S_N) se interceptan

$$(O_2)_e = \frac{I_f - I_N}{S_N - S_f} \quad (57)$$

$$(CO_2)_e = \frac{\alpha^{prom}}{\beta} * ((O_2)_e - (O_2)_o) + (CO_2)_e \quad (58)$$

Una vez calculada la composición de gas al equilibrio el software calcula el área necesaria para el intercambio de gases cuando el sistema alcanza el estado estacionario, usando la ecuación 22 o 23 (sin incluir el grosor de la película (L)). Esta área calculada es comparada con el área de la película en el empaque (A_f), de donde si $A > A_f$ el diseño es imposible, si $A < A_f$ el área requerida se alcanza usando etiquetas de área igual a ($A_f - A$).

Mahajan et al. (2004) reportan que este software ha sido probado exitosamente para una amplia variedad de productos.