UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Configuración de un sistema de empaque activo con inclusión de un absorbente de humedad y un agente antimicrobiano para la preservación de la vida útil de fresa *(Fragaria ananassa)*

Yurany Rocío Mahecha Rubiano

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Área Curricular de Alimentos y Agroindustria
Bogotá, Colombia
2024

Configuración de un sistema de empaque activo con inclusión de un absorbente de humedad y un agente antimicrobiano para la preservación de la vida útil de fresa *(Fragaria ananassa)*

Yurany Rocío Mahecha Rubiano

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Director:

Dr. Diego Alberto Castellanos Espinosa

Línea de Investigación:

Calidad y empaques para alimentos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Área Curricular de Alimentos y Agroindustria

Bogotá, Colombia

2024

“Todo tiene su tiempo, y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora”

Eclesiastés 3:1

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Yurany Mahecha R.

Yurany Rocío Mahecha Rubiano

Fecha: 30/01/2024

Agradecimientos

A mi familia y amigos incondicionales, Deissy y Camilo, por su apoyo y motivación durante este proceso.

Al profesor Diego A. Castellanos, por la paciencia, motivación y entrega de su tiempo y su amplio conocimiento para la construcción de este trabajo final de maestría y mi formación académica el cual ha estado presente desde el primer día.

A la Facultad de Ciencias Agrarias, al laboratorio de calidad y poscosecha de productos agricolas, y al laboratorio de empaques y vida útil de alimentos, por el apoyo brindado facilitando el uso de materiales y equipos para realizar la fase experimental correspondiente de este trabajo.

A los laboratoristas Yaneth Rojas y Ernesto Caballero por su apoyo en la realización de los análisis correspondientes a este trabajo.

A la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Cundinamarca por la financiación de esta investigación a través de la Convocatoria de proyectos de investigación en conjunto entre estas universidades, Sede Bogotá – 2020.

Resumen

Configuración de un sistema de empaque activo con la inclusión de un adsorbente de humedad y agentes antimicrobianos para la preservación de la vida útil de fresa *(Fragaria ananassa).*

En este trabajo final de maestría se planteó la configuración de un sistema de empaque activo para la preservación de frutos de fresa en fresco, incluyendo materiales biodegradables, elementos activos de adsorción de humedad como las arcillas naturales, liberación controlada de sustancias antifúngicas de origen natural como aceites esenciales y regulación de los niveles de O_2 y CO_2.

Inicialmente, se realizó la caracterización de la respiración y transpiración de los frutos frescos de fresa para lograr determinar posteriormente los niveles de gases adecuados para la preservación del producto a partir de la transferencia requerida de gases. Para esto se utilizaron empaques rígidos sellados en la parte superior con una película de ácido poliláctico (PLA) de 30µm de espesor, con una microperforación (545 µm) en su parte central para modificar la atmosfera del interior del sistema. El tamaño de la perforación requerida se determinó con base en los resultados de la respiración de los frutos de fresa y considerando el propósito de alcanzar niveles de equilibrio de O_2 y CO_2 adecuados para reducir el deterioro de la fruta a temperatura ambiente (20 °C) y temperatura de refrigeración (4 °C).

Posteriormente, se evaluó la inclusión de un elemento activo en forma de sachets combinando bentonita en polvo con sustancias antimicrobianas de aceites esenciales naturales. Para esto, se evaluó el efecto cinamaldehído, eugenol y mentol a diferentes

cantidades saturadas en los sachets con bentonita, considerando la capacidad de adsorción de humedad, las concentraciones requeridas de los aceites y la velocidad de liberación de los componentes para minimizar el deterioro de las frutas. Finalmente, una vez ajustados los sachets con cantidades apropiadas de bentonita y de los agentes preservantes, se evaluó el efecto de su inclusión en el sistema de empaque sobre la aceptabilidad sensorial, evidencia de deterioro microbiológico además de los cambios observados en varias propiedades fisicoquímicas del producto. Entre estas se hizo el seguimiento de la actividad de agua (a_w), solidos solubles totales (SST), acidez total titulable (ATT), firmeza a la penetración y color de la corteza (L*, a*, b*). Así mismo, al evidenciarse deterioro microbiológico, se tomaron muestras para identificar los microorganismos responsables del deterioro a cada una de las condiciones de empaque y el efecto del elemento activo preservante sobre su crecimiento y actividad en el sistema de empaque.

Como resultado de la configuración del sistema de empaque activo, el tratamiento con 0,05 g de mentol integrado con 2 g de bentonita resultó en la inhibición del deterioro microbiano hasta por 25 días para los frutos conservados a 4,0 ± 0,2 °C y 80 ± 2 % de humedad relativa. A condiciones ambientales (20,0 ± 0,5 °C y 60,0 ± 3 % de HR) los diferentes tratamientos preservantes evaluados incluyendo los sachets de bentonita (2 g) y sustancias preservantes (0,01 - 0,025 g de mentol, 0,05 - 0,3 ml de cinamaldehído y 0,07 - 0,42 ml de eugenol) no resultaron en diferencias significativas obteniéndose un tiempo de preservación de 5-6 días.

Los resultados obtenidos constituyen un importante avance en el desarrollo de un sistema de empaque para la preservación de frutos de fresa de bajo costo y hecho a base de materiales sostenibles y de fácil consecución. Esto puede servir de base para realizar estudios posteriores de escalado a condiciones reales de almacenamiento y comercialización.

Palabras clave: Aceites esenciales, adsorbente de humedad, agentes antimicrobianos, empaque activo, liberación controlada.

Abstract

Configuration of an active packaging system with the inclusion of a moisture adsorbent and antimicrobial agents to preserve the useful life of strawberry (Fragaria ananassa).

In this work, the configuration of an active packaging system for the preservation of fresh strawberry fruit is proposed by including biodegradable materials, an active element with moisture adsorption and controlled release of natural antifungal substances such as essential oils, and finally, regulation of O_2 and CO_2 levels.

Initially, the characterization of the respiration and transpiration of fresh strawberry fruits was carried out to determine the appropriate gas levels for product preservation from the required gas exchange. For this, rigid trays were used and sealed at the top with a polylactic acid (PLA) film of 30 µm to which a micro-perforation (545 µm) was made in its central part to modify the atmosphere inside the system. The size of the required perforation was determined based on the frui'ts respiratory intensity achieving a steady O_2 and CO_2 level to reduce the product deterioration at room temperature (20 °C) and refrigeration (4 °C).

Subsequently, the inclusion of an active element in the form of sachets was evaluated by combining powdered bentonite with antimicrobial substances from natural essential oils. For this, the effect of cinnamaldehyde, eugenol, and menthol was evaluated in pure form and at different saturated quantities in the sachets with bentonite, considering the moisture adsorption capacity, the required concentrations of the oils and the release rate of the

components to minimize deterioration and spoilage. Finally, once the sachets were adjusted with appropriate amounts of bentonite and preservative agents, the effect of their inclusion in the packaging system on sensory acceptability, evidence of microbiological deterioration, and changes observed in various physicochemical characteristics were evaluated. Among these, water activity (a_w), total soluble solids (TSS), total titratable acidity (ATT), firmness to penetration, and color on the peel (L*, a*, b*) were monitored. Likewise, when microbiological deterioration was evident, samples were taken to identify the microorganisms responsible for each of the packaging conditions and the effect of the active preservative element on their growth and activity in the packaging system.

As a result of the configuration of the active packaging system, treatment with 0.05 g of menthol integrated with 2 g of bentonite resulted in the inhibition of microbial deterioration for up to 25 days for fruits preserved at 4.0 ± 0.2 °C and 80 ± 2% relative humidity. At ambient conditions (20.0 ± 0.5 °C and 60.0 ± 3 % RH) the different preservative treatments evaluated including bentonite sachets (2g) and preservative substances (0.01 – 0.025 g of menthol, 0.05 - 0.3 ml of cinnamaldehyde and 0.07 - 0.42 ml of eugenol) did not result in significant differences, obtaining a preservation time of 5- 6 days.

The results obtained constitute an important advance in the development of a packaging system for the low-cost preservation of strawberry fruits made from sustainable and easily available materials. This can serve as a basis for carrying out subsequent studies of scaling up to real storage and marketing conditions.

Keywords: Essential oils, moisture absorbent, antimicrobial agents, active packaging, controlled release.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XVI**

Lista de tablas ..... **XVIII**

Lista de Símbolos y abreviaturas ..... **XIX**

Introducción **21**

Capítulo 1. Revisión de literatura **29**
1.1 El cultivo y la producción de fresa 29
1.1.1 Descripción botánica y morfológica 29
1.1.2 Propiedades nutricionales 29
1.1.3 Condiciones agroclimáticas 30
1.1.4 Variedades de fresa en Colombia y el mundo 31
1.1.5 Área cultivada y producción a nivel nacional 32
1.1.6 Cosecha y poscosecha 32
1.1.7 Índices de madurez para recolección y comercialización 34
1.1.8 Normatividad vigente para el cultivo y comercialización 35
1.1.9 Comercialización 36
1.1.10 Métodos para la conservación de frutas frescas 37
1.1.11 Metabolismo 38
1.1.12 Microorganismos causantes de deterioro y perdida de vida útil 39
1.1.13 Características sensoriales y de aceptabilidad por el consumidor 40
1.2 Sistemas de empaques 41
1.2.1 Empaques para productos hortofrutícolas frescos 42
1.2.2 Empaques para fresa 43
1.2.3 Sistemas de empaques activos 44
1.2.4 Ventajas de los sistemas de empaques activos 45
1.2.5 Desventajas de los sistemas de empaques activos 45
1.2.6 Empaques con atmosferas modificadas 45
1.3 Adsorbentes de humedad 46
1.3.1 Bentonita 47
1.4 Agentes antimicrobianos 48
1.4.1 Aceites esenciales en la conservación de frutas en fresco 49

Capítulo 2. Determinación de la influencia del O_2 y CO_2 sobre la velocidad de respiración y deterioro de frutos de fresa en fresco a diferentes temperaturas de almacenamiento 53
2.1 Materiales 53
2.1.1 Material vegetal 53
2.1.2 Materiales de empaque 54
2.2 Metodología 55
2.2.1 Pruebas experimentales de respiración 55
2.2.2 Determinación experimental de la cinética de respiración de consumo de consumo de oxígeno (O_2) y la producción de dióxido de carbono (CO_2). 55
2.2.3 Ajuste de un modelo cinético de respiración 56
2.2.4 Efecto de los niveles de oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2) en la preservación de frutos de fresa a diferentes temperaturas de almacenamiento. 58
2.3 Resultados y discusión 59
2.3.1 Cinéticas de respiración e influencia del O_2 y CO_2 a diferentes temperaturas de almacenamiento 59
2.3.2 Modelos cinéticos de respiración 61
2.3.3 Efecto de los niveles de oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2) en la preservación de frutos de fresa a diferentes temperaturas de almacenamiento. 64
2.3.4 Conclusiones 66

Capítulo 3. Evaluación del efecto de tres componentes antimicrobianos y de un material adsorbente tipo arcilla sobre el deterioro y aceptabilidad de fresa determinando concentraciones apropiadas de actuación. 69
3.1 Materiales 69
3.1.1 Matriz adsorbente 69
3.1.2 Agentes preservantes antimicrobianos 70
3.1.3 Materiales de empaque 70
3.2 Metodología 70
3.2.1 Determinación de una cantidad apropiada de bentonita en el sistema de empaque con atmosfera modificada 70
3.2.2 Efecto de los agentes antimicrobianos en estado puro a diferentes cantidades en la preservación de los frutos empacados 71
3.3 Resultados y discusión 72
3.3.1 Inclusión de la bentonita en el sistema de empaque 72
3.3.2 Evaluación del efecto preservante de los agentes antimicrobianos en el sistema de empaque 75
3.3.3 Conclusiones 79

Capítulo 4. Inclusión de un elemento activo combinando bentonita y agentes preservantes en el sistema de empaque 81
4.1 Metodología 81
4.1.1 Preparación de los tratamientos para el ensayo de empaque activo combinado 81
4.1.2 Prueba de empaque y almacenamiento con la inclusión de bentonita combinada con los agentes antimicrobianos 82
4.1.3 Evaluación de la calidad y aceptabilidad sensorial de los frutos en el empaque activo con los agentes preservantes 84
4.1.4 Análisis microbiológico 85
4.1.5 Análisis estadístico 85
4.2 Resultados y discusión 85

4.2.1 Tiempo de preservación de los frutos bajo los diferentes tratamientos de empaque activo 85
4.2.2 Cambios en las propiedades fisicoquímicas de los frutos empacados 90
4.2.3 Aceptabilidad sensorial 97
4.2.4 Análisis microbiológico 99
4.2.5 Conclusiones 105

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones 107
5.1 Conclusiones 107
5.2 Recomendaciones 108

Bibliografía 111

Anexo A. Ponencia oral. Congreso internacional de ingeniera química. WCCE11. Buenos Aires, Argentina, 2023. 122

Lista de figuras

Figura 1.1 Carta de color de la fresa (fragaria ananassa) de acuerdo con su estado de madurez (ICONTEC, 2022). 34
Figura 1.2 Empaques de fresa empleados para el mercado nacional y de exportación (Logihfrutic, 2018). 37
Figura 2.1 Diseño empaque tipo "clamshell" de PLA con abertura en tapa sellada con película de PLA. Fuente propia. 48
Figura 2.2 Montaje para la evaluación experimental de la respiración de frutos de fresa fresca. 52
Figura 2.3 Concentraciones experimentales de consumo de oxígeno (O_2) y producción de dióxido de carbono (CO_2) para los frutos de fresa almacenados en los recipientes herméticos a 3°C (A), 10°C (B) y 20°C (C). Se incluye la desviación estándar n = 3. …. 53
Figura 2.4 Fracciones molares de consumo de O2 y producción de CO2 experimentales (círculos) y calculadas (líneas) con la cinética de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO2 para frutos de fresa a 3°C (A), 10°C (B) y 20°C (C) en función del tiempo. 55
Figura 2.5 Tiempos de deterioro de frutos de fresa empacados en bandejas selladas de PLA con perforaciones de diferentes tamaños y almacenados a 4 °C (A) y a 20 °C (B). Desviación estándar incluida para n = 4. 58
Figura 3.1 Secuencia de montaje de los empaques con fresa y la inclusión de las sustancias preservantes en estado puro. 72
Figura 3.2 Tiempos de deterioro de frutos de fresa empacados en canastillas selladas con películas perforadas de PLA e incluyendo diferentes cantidades de bentonita en sachets porosos a 4°C y 80% HR y 20°C y 60° HR respectivamente. Desviación estándar incluida para n = 4. 74

Figura 3.3 Pérdida de peso de los frutos empacados con 1 g, 2g y 5 g de bentonita en sachets a temperaturas de 4 °C y 80 % HR (A) y 20 °C y 60 % HR (B)..... 75
Figura 3.4 Tiempos de deterioro de frutos de fresa empacados en canastillas selladas con películas perforadas de PLA e incluyendo diferentes tratamientos de cinamaldehído (C), aceite esencial de clavo (E) y mentol (M) en cajas de Petri a 4 °C y 80 % HR de acuerdo con la Tabla 3.1 77
Figura 3.5 Tiempos de deterioro de frutos de fresa empacados en canastillas selladas con películas perforadas de PLA e incluyendo diferentes tratamientos de cinamaldehído (C), aceite esencial de clavo (E) y mentol (M) en cajas de Petri a 20 °C y 60 % HR de acuerdo con la Tabla 3.1. 77
Figura 3.6 Condensación de agua en la superficie interna de los empaques de PLA con frutos de fresa. 78
Figura 4.1 Disposición del sistema de empaque activo para los frutos de fresa con los sachets de bentonita mezclada con los diferentes agentes antifúngicos, aceite esencial de clavo/eugenol y mentol. 83
Figura 4.2 Tiempo de preservación de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol en sachets con bentonita a 4 °C y 80 % de HR (A) y 20 °C y 60 % HR (B) respectivamente..... 86
Figura 4.3 Evolución visual de los frutos de fresa bajo tratamientos seleccionados de empaque activo. A) solo atmósferas modificadas a 4 °C, B) inclusion de sachets con 50 mg de mentol + 2 g de bentonita 4 °C, C) sachets con 100 µl de cinamaldehído + 2 g de bentonita a 20 °C..... 87
Figura 4.4 Fracciones molares de O2 y CO2 para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo sachets de bentonita y cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) o mentol a 4 °C y 80 % de HR (A) y 20 °C y 60 % de HR (B). Desviación estándar incluida para n = 3. 88
Figura 4.5 Aislamiento de hongos de fresa (A), observaciones microscópicas de hongos de fresa. 100
Figura 4.6 Rotulado de muestras analizadas.....101
Figura 4.7 Resultados de la siembra del tratamiento 8.100C+70E para Botrytis cinerea 102
Figura 4.8 Resultados del segundo ensayo de siembra para Botrytis cinerea A) Tratamiento 1.70E. B) Tratamiento 12.100M C) Tratamiento 8.100C+70E.....103
Figura 4.9 Resultados tratamiento 5.AM.....104

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2.1 Parámetros de respiración estimados para las cinéticas enzimáticas de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva de frutos de fresa a diferentes temperaturas. …… 54
Tabla 2.2 Fracciones molares de O2 y CO2 medidas en el espacio de cabeza de bandejas termoselladas de PLA perforadas y con frutos de fresa a 4 y 20 ± 1 °C…… 55
Tabla 3.1 Tratamientos de sustancias preservantes evaluados en estado puro dentro de los sistemas de empaque. 72
Tabla 4.1 Tratamientos empleados para la prueba de configuración del sistema de empaque activo para frutos de fresa. 82
Tabla 4.2 Evolución de las coordenadas de color CIELAB de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR….. 90
Tabla 4.3 Evolución de las coordenadas de color CIELAB de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmosferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 20 °C y 60 % de HR… 92
Tabla 4.4 Firmeza a la penetración de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR y 20 °C y 60 % de HR. 93
Tabla 4.5 Evolución de actividad de agua, solidos solubles y acidez titulable de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR y a 20°C y 60 % de HR. 95
Tabla 4.6 Evaluación sensorial de aroma de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR y a 20 °C y 60 % de HR. 98
Tabla 4.7 Evaluación sensorial de sabor de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR y a 20 °C y 60 % de HR. 99
Tabla 4.8 Presencia o ausencia de hongos en frutos de fresa. 104

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
ATT	Acidez total titulable	%
A	Área de transferencia	m^2
a_w	Actividad de agua	
a*	Coordenada cromática CIELAB rojo (+) / verde (-)	
AM	Atmosfera modificada	
b*	Coordenada cromática CIELAB amarillo (+) / azul (-)	
°C	Grados Celsius	
CO_2	Dióxido de carbono	
cm	Centímetros	cm
Cel	Celulosa	
Ea	Energía de activación	kJ mol^{-1}

AME	Atmosferas modificadas en equilibrio	
F	Firmeza a la penetración	N
HR	Humedad relativa	%
H_2O	Agua	
Km	Constante de Michaelis-Menten	
Kmu	Constante de inhibición por CO_2. Cinética de Michaelis-Menten	
L*	Luminosidad CIELAB	
l	Espesor de la película	mm
µm	Micras	
µl	Microlitros	
µg	Microgramos	
mm	Milímetro	
MMA	Modelo de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2	
O_2	Oxígeno	
PLA	Ácido poliláctico	
PET	Tereftalato de polietileno	
pH	Concentración de iones de hidrógeno	
P	Presión	
R	Constante universal de los gases (0,008314)	$kJ\ mol^{-1}\ K^{-1}$
r_{O2}, r_{CO2}	Velocidades de respiración: consumo de O_2 y producción de CO_2	$cm^3\ kg^{-1}\ d^{-1}$
r_{O2max}, r_{CO2max}	Velocidad máxima de consumo de O_2 y producción de CO_2	
R^2_{adj}	Coeficiente de determinación ajustado	
SST	Solidos solubles totales	%
T	Temperatura	K / °C
T_{ref}	Temperatura de referencia	K / °C
t	Tiempo	d
t_{+1}, t_{-1}	Tiempos precedentes y subsecuentes a un tiempo t de medición	
V	Volumen libre del empaque	cm^3
W	Peso del producto	kg
y_{O2}, y_{CO2}	Fracción molar de O_2 y CO_2	

Introducción

Las frutas y verduras continúan con muchos de sus procesos metabólicos naturales después de su recolección, es decir, madurando y envejeciendo (Martínez et al., 2017). Estos procesos se mantienen hasta el agotamiento de sustratos y fuentes de energía lo que lleva al inicio de la etapa de senescencia y muerte celular (Campos-Vargas et al., 2013). Como parte del metabolismo de estos productos, es necesaria la degradación continúa de componentes macromoleculares de reserva como almidones, azúcares y ácidos orgánicos para la obtención de energía a través del proceso de respiración en donde la presencia de oxígeno (O_2) en el ambiente alrededor del producto juega un papel fundamental (Kader, 2002). La velocidad de respiración en un vegetal estará directamente relacionada con la velocidad de deterioro y además del nivel de oxígeno (O_2) en el ambiente también dependerá de otros factores tales como la especie, variedad, grado de maduración (cantidad de sustratos consumidos), la temperatura y la composición de otros gases relacionados con la respiración como el etileno (hormona de la maduración) y el dióxido de carbono (CO_2, producto e inhibidor de la respiración) (Jiang & Joyce, 2003). Cuanto mayor sea el incremento de la intensidad respiratoria la vida útil será menor (Bonghi et al., 2011).

Factores intrínsecos y extrínsecos relacionados al deterioro

Entre los factores extrínsecos más relevantes para el control de la velocidad de respiración está la temperatura (Kader, 2002). La velocidad de degradación y desarrollo de los procesos metabólicos dependen directamente de esta, por lo cual es posible el incremento de la vida útil almacenando el producto a condiciones óptimas de refrigeración (Artes et al., 2000). El segundo aspecto extrínseco más relevante es la actividad microbiana. El crecimiento de microorganismos causantes de deterioro conllevará la alteración y pérdida de nutrientes en el producto y su rechazo por parte del consumidor, mientras que el desarrollo de microrganismos conducirá a ocasionar intoxicaciones o enfermedades transmitidas por alimentos (ETAS) (Majowicz et al., 2010).

Los niveles de gases en la atmosfera que rodea el producto fresco son otro factor extrínseco de gran relevancia. La concentración de oxígeno estará directamente relacionada con la velocidad de respiración y de degradación de otros componentes importantes en el producto como antioxidantes o pigmentos, y además influirá directamente en el crecimiento y actividad de microorganismos aerobios (Lee & Kim, 2016). En el caso de la humedad, bajos niveles de humedad relativa (HR) en el aire llevarán a la deshidratación excesiva del vegetal y a defectos de calidad sensorial como arrugamiento, perdida de turgencia y marchitamiento. Por otra parte, altos niveles de (HR) cercanos a la saturación conducirán a la condensación del agua y el incremento de la actividad microbiana al haber más agua libre para el crecimiento de microorganismos (Pérez & Rojas, 2008).

Respecto a los factores intrínsecos propios del alimento fresco, la actividad de agua (a_w) es la que puede relacionarse más estrechamente con los procesos de deterioro. Altos niveles de agua fomentan el crecimiento microbiano y también el desarrollo de procesos enzimáticos de degradación (Soria et al., 2015). Otros factores causantes de deterioro son el pH, el tipo y abundancia de sustratos presentes en el producto, microbiota natural, contenido de sustancias preservantes y barreras estructurales (Guía et al., 2010). Así mismo las características del producto final, procesado o mínimamente procesado conducirán a que se puedan desarrollar o no mecanismos de deterioro o pérdida de la calidad a lo largo del tiempo (FAO, Food and Agriculture Organization , 1999).

Una vez identificados estos factores intrínsecos y extrínsecos que hacen más vulnerable el producto al deterioro, es conveniente identificar los requerimientos de conservación del mismo para establecer las técnicas más adecuadas de manejo que deben emplearse para incrementar la preservación a lo largo de toda la cadena de producción, distribución y comercialización (García et al., 2010).

Empaque y vida útil

En el caso de la cadena de producción de fresa, uno de los aspectos más importantes relacionados con el aseguramiento de la calidad es el empaque. Este tiene como funciones primordiales preservar el alimento además de contenerlo, facilitar su transporte y ser de conveniencia para su uso (Ramírez et al., 2014). Para obtener una buena capacidad de preservación, el empaque debe por lo menos tener propiedades adecuadas de barrera a gases, humedad y luz, protección mecánica y suficiente estabilidad de tal forma que se reduzcan al mínimo las posibles interacciones indeseadas empaque – alimento - ambiente.

Así mismo, para productos muy susceptibles al deterioro puede ser necesario que el empaque tenga una capacidad conservante adicional reduciendo la actividad microbiana y los procesos bioquímicos propios que conducen al deterioro (Osorio et al., 2015). Además, el empaque debe ser conveniente y funcional para el consumidor reduciendo la posibilidad de desperdicio del alimento y también debe ser sustentable reduciendo el impacto ambiental generado (Arrieta et al., 2018). El uso de materiales como poliestireno expandido (EPS) o polietileno (PE) ha empezado a descontinuarse debido al corto ciclo de vida útil propio de empaques y envases de un solo uso y para alimentos perecederos, y a su largo impacto en el medio ambiente dada su imposibilidad de degradación a corto o mediano plazo. Debido a lo anterior, la nueva generación de empaques para productos perecederos como la fresa debe además de proteger y preservar el producto, utilizar materiales sustentables de bajo impacto ambiental (Rivas & Rodríguez, 2020).

La vida útil de frutas como la fresa es corta, debido a su alta actividad de agua, a su elevada velocidad de respiración y a su baja resistencia mecánica a golpes y manipulación excesiva (Pérez et al., 2006). Lo anterior se traduce en la perdida de características organolépticas y nutricionales como sabor, color, textura, capacidad de retención de agua, antioxidantes y pigmentos. Este tipo de procesos de deterioro afectan a buena parte de los alimentos comercializados en fresco por lo cual se requieren técnicas que permiten prolongar la vida útil de los mimos sin que sus características organolépticas, químicas y físicas naturales se vean afectadas (Beltrán & Gómez, 2017). Entre los métodos de preservación con más posibilidades de aplicación en la actualidad se encuentran los empaques con atmosferas modificadas (AM) y los empaques activos.

En el caso de los sistemas de AM, se busca la variación de los niveles de gases a los cuales está expuesto el producto, sobre todo O_2, CO_2 y vapor de agua, para alcanzar condiciones favorables de preservación (Liu, et al., 2017).El uso de empaques con AM puede reducir la velocidad de los procesos metabólicos en el producto, principalmente las velocidades de respiración y de transpiración (Almenar et al., 2006). A menores concentraciones de O_2 y mayores concentraciones de CO_2, la velocidad metabólica y el deterioro se verán reducidos. En el caso de la fresa su alto metabolismo, implica una alta intensidad respiratoria y una alta velocidad de transpiración y perdida de humedad (Capocasa et al., 2012).

En cuanto a los empaques activos, en estos sistemas se incluye un elemento activo que interactúa con el alimento de tal forma que se mantengan o incluso se mejoren sus

propiedades de calidad. Para vegetales perecederos, principalmente se usan sustancias antimicrobianas, antioxidantes, removedores de humedad, de oxígeno o de etileno (Pérez-Gago et al., 2006). En productos como la fresa un sistema activo estará orientado al control del metabolismo (maduración, respiración, transpiración, producción de etileno) del producto y el crecimiento de microorganismos causantes de deterioro, principalmente mohos (Galvis-Sánchez et al., 2014). En la práctica para lograr la preservación del producto el sistema activo debe estar diseñado para la remoción activa de humedad, la liberación controlada de sustancias preservantes que eviten el deterioro inducido por mohos como *Botrytis cinerea* (Amiri et al., 2019) y la estabilización de atributos de calidad como color, aroma, textura y sabor.

Para un producto con tantos factores relacionados al deterioro como la fresa, un sistema de empaque simple difícilmente puede copar con todos los requerimientos requeridos para mantener la calidad del producto de forma simultánea por lo cual es necesario proponer un sistema de empaque que integre múltiples componentes o subsistemas para reducir el deterioro causado por microorganismos, retrasar la senescencia y minimizar las pérdidas de producto y el desperdicio de recursos para su producción y distribución.

Considerando lo anterior, para dar desarrollo a este proyecto se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el efecto de la aplicación individual y combinada de agentes antifúngicos de origen natural y un material adsorbente de humedad con atmosferas modificadas en un sistema de empaque activo para la preservación de la vida útil de fresa *(Fragaria ananassa)* en fresco?

Justificación

La fresa con sus diferentes variedades es un fruto de gran importancia para el sector frutícola en Colombia (Asohofrucol, 2021) Las variedades más cultivadas en el territorio nacional son palomar, monterrey, albión, san andreas, porque son particularmente más precoces y resistentes a algunas enfermedades, tienen mayores índices de producción y por ende comercialización. Según (Agronet, 2023) se reporta para el año 2021, una producción estimada de 145.411 toneladas de fresa en el territorio nacional. La mayor participación por departamentos la tiene Antioquia con (53,6 %), Cundinamarca (13,1 %), Boyacá (10,6 %), Valle del Cauca (6,2 %), entre otros con índices de producción mínimos.

A nivel municipal en Cundinamarca, entre los mayores productores se destacan Sibaté, Facatativá, Soacha y Chocontá, entre otros (SIPSA, 2021).

La fresa es una fruta reconocida por sus propiedades nutricionales y curativas, por su fuente de vitaminas y antioxidantes, por su color llamativo, sabor y aroma. Todas las cualidades anteriores convierten a la fresa en un producto apetecido por mercados a nivel industrial, medicinal y culinario (Minagricultura, 2021). El aporte calórico de las fresas es de 32.24 kcal por cada 100 g de fruta, 5.51 g corresponde a carbohidratos, en cuanto a los minerales posee 1.4 mg de sodio, 21.47 mg de calcio, 0.46 mg de hierro y 54.93 mg de vitamina C (Asohofrucol, 2021).

Uno de los principales problemas de productos como la fresa en Colombia es su alta perecibilidad. En Colombia se pierden cerca de 9, 76 millones de toneladas de alimentos al año, de los cuales 6,08 millones corresponden a pérdidas de frutas y vegetales. Esto equivale al 58% de los alimentos producidos. De esta cantidad perdida, 3,95 millones de toneladas corresponden a pérdidas en las etapas de producción y transformación (Agronegocios, 2022).

Considerando los índices de crecimiento de la producción de fresa en el país (ICA, 2020), la producción de este fruto ha tenido un crecimiento sostenido en los últimos años. En el año 2016 se produjeron alrededor de 105.000 toneladas, mientras que para el año 2020 la producción aumentó a 148.532 toneladas, representando un crecimiento del 41,5 % en esos cuatro años . Para el año 2021 la producción aumento en un 18,6 % en comparación con el año anterior. Este incremento se da debido a la adopción de nuevas tecnologías y practicas agricolas eficientes y el aumento en la demanda del mercado nacional e internacional.

Para mejorar la eficiencia en la producción de fresa se requieren tecnologías que lleven a una reducción en las pérdidas de producto con lo cual se pueden cumplir los objetivos de desarrollo sostenible de “hambre cero” y “producción y consumo responsable”. Para contribuir a alcanzar este propósito productos de alta relevancia económica como la fresa puedan ser preservados en empaques o envases especialmente configurados a sus necesidades que extiendan su vida útil y mantengan sus características de calidad.

Objetivos del trabajo final

Teniendo en cuenta la introducción, planteamiento del problema y la justificación previamente expuestos, se plantea como objetivo de este trabajo final evaluar la vida útil y cambios de calidad de fresa en fresco en un sistema de empaque activo con atmósferas modificadas y con la incorporación de un elemento activo con liberación controlada de un agente antimicrobiano y adsorción de humedad.

Para lograr el objetivo de investigación se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1) Determinar la influencia del O_2 y CO_2 sobre la velocidad de respiración y deterioro de frutos de fresa en fresco a diferentes temperaturas de almacenamiento.

2) Evaluar el efecto de dos componentes antimicrobianos volatilizables de origen natural y de un material adsorbente de humedad tipo arcilla sobre el deterioro y aceptabilidad de fresa determinando concentraciones apropiadas de actuación.

3) Configurar un sistema de empaque activo con el uso de atmósferas modificadas y la inclusión de un material adsorbente de humedad y liberación controlada de un compuesto antifúngico para la preservación de fresa a condiciones ambiente y de refrigeración.

Estructura del documento

Este documento consta de cuatro capítulos, además de su resumen, introducción, planteamiento del problema, justificación y objetivos. En el capítulo 1, se realizó la recopilación de literatura relacionada a la temática de los empaques y sistemas de empaque, del fruto a trabajar y de los materiales naturales incluidos como preservantes. En el capítulo 2 se describen los materiales necesarios, la metodología, resultados y conclusiones obtenidas para determinar la influencia del O_2 y CO_2 sobre la velocidad de respiración y deterioro de los frutos evaluados a diferentes temperaturas de almacenamiento. En el capítulo 3 se presentan los materiales, metodología, resultados y conclusiones de la evaluación del efecto de los antimicrobianos y del material adsorbente sobre el deterioro y la aceptabilidad de los frutos determinando las concentraciones apropiadas de actuación. En el capítulo 4, se presenta la metodología, resultados de evaluación de vida útil, análisis fisicoquímico, microbiológico, estadístico y sensorial para los diferentes tratamientos evaluado, junto con sus respectivas conclusiones. Para finalizar

en el capítulo 5, se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones para futuros estudios con frutas similares.

En los anexos se evidencia el certificado de asistencia en la participación con una ponencia oral en un evento científico de divulgación “Congreso Internacional de Ingeniería Química” Buenos Aires, Argentina, 2023.

Este trabajo fue desarrollado con recursos y en el marco del proyecto “Evaluación de materiales activos con adsorción de humedad en el desarrollo de sistemas de empaque para la preservación de productos vegetales perecederos” Código Hermes 50970 financiado en parte con recursos de la *Convocatoria de proyectos de investigación conjuntos entre la Universidad de Cundinamarca y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá – 2020.*

Capítulo 1. Revisión de literatura

1.1 El cultivo y la producción de fresa

1.1.1 Descripción botánica y morfológica

La fresa o frutilla *(Fragaria vulgaria sp; Fragaria ananassa; Fragaria chilonesis L)*, pertenece a la familia de las rosáceas, al género Fragaria y es una planta rastrera estolonífera (Ferreira et al., 2014). Aunque su origen no se conoce a ciencia cierta, según la literatura procede de los Alpes Europeos y Chile en América del Sur (InfoAgro, 2019). Es una especie hortícola, herbácea, caracterizada por el crecimiento de hojas y órganos en la parte leñosa de la corona, considerada como una planta perenne de vida corta, vigorosa y rustica (Bonilla Correa, 2011). Sus flores se agrupan en inflorescencias de 5 a 6 sépalos de color verde y de 5 a 6 pétalos de color blanco. La corona es una roseta de aprox. 2,5 cm que contiene tejidos vasculares, en su base contiene hojas y yemas que forman coronas nuevas. La raíz es de aspecto fibroso desarrollada por lo general a 30 cm de profundidad. Sus frutos constituyen la parte comestible de la planta. Estos son de forma globosa, cónica o de corazón y de tamaños proporcionales a los de las flores. Su color varía de rojo pálido a intenso. Sus hojas se conforman de tres bordes aserrados con diferentes tamaños de acuerdo con la variedad (Fennell & Dun, 1989).

Dentro de las propiedades fisicoquímicas del fruto de fresa se conoce que el peso varía de acuerdo con la variedad, entre 14 y 16 g por unidad. La concentración de azucares está entre 6,7 a 7,28 % (p/p) (Liu et al., 2015) mientras que el porcentaje de acidez es de 1,06% expresado como ácido cítrico (Wang & Lin, 2000). En el fruto, el sabor está condicionado por el balance de azucares y acidez. Tiene un olor frutal dulce característico y posee un brillo intenso y un color rojizo claro u oscuro uniforme dependiendo su estado de madurez. Su pulpa es de color blanco, rosado o rojizo de acuerdo a su variedad. La textura del fruto es suave con firmeza moderada pero frágil (Sánchez et al., 2007).

1.1.2 Propiedades nutricionales

Los frutos de fresa aportan vitamina C, antocianinas y ácidos orgánicos como ácido cítrico, málico, oxálico y salicílico en pequeñas proporciones (Casierra et al., 2011). Así mismo, este producto tiene un bajo contenido energético y está compuesto principalmente después del agua por hidratos de carbono que contienen fructosa, glucosa y xilitol (Kessel Domini, 2012).Según Asohofrucol (2021), la composición proximal de la fresa, en 100 g de producto, es de 89,9 g de agua, 0,7 mg de proteína, 0,5 mg de grasas, 6,9 g de carbohidratos, 190 mg de potasio, 12 mg de magnesio, 60 mg de vitamina C, 23 mg de vitamina E, 55 mg de antocianinas totales, además de otros componentes minoritarios. El aporte calórico del fruto es de 32 kcal por 100 g.

1.1.3 Condiciones agroclimáticas

El cultivo de la fresa se clasifica en grupos, de acuerdo a las horas de luz de exposición recomendada para cada variedad, días largos, cortos o neutros. Esto dependiendo de la zona geográfica donde se destine el cultivo (Soria et al., 2015). Aquellas plantas de día corto responden al fotoperiodo o duración del día, es decir, que requieren días cortos con una duración inferior a 14 horas de luz para el correcto desarrollo de las yemas florales.

En Colombia las variedades más cultivadas pueden presentar dos periodos de cosecha por temporada. Las plantas de días neutros son aquellas variedades que no presentan respuesta al fotoperiodo, pero requieren temperaturas de suelo superiores a los 12°C. Las plantas de días largos son aquellas que florecen y producen sus frutos durante los meses más cálidos del año, cuando los días son más largos que las noches. La producción y el tamaño de los frutos son más homogéneos durante la temporada y dependiendo de la variedad, su producción es más estable lo cual ayuda a los productores a preparar de antemano estimados del tiempo y volumen de cosecha (Altamirano, 2014).

La planta de fresa se desarrolla de manera adecuada en suelos ligeramente ácidos, sueltos, aireados y bien drenados (Kessel Domini, 2012). Su raíz es altamente sensible a la salinidad lo que ha llegado a generar reducciones de hasta el 50% del rendimiento por planta (Kafkas et al., 2015). No se debe sembrar en suelos donde anteriormente se sembró papa, tomate, pimentón, melón, sandía con el objetivo de prevenir la propagación de enfermedades que se comparten con estos cultivos (Ospina Meneses & Cartagena Valenzuela, 2008). Los picos de producción se alcanzan en las épocas del año en que el clima es más frío (Altamirano, 2014). Durante el cultivo, las bajas temperaturas inducen floración y

producción de frutos mientras que las temperaturas altas inducen el desarrollo vegetativo y formación de hojas (Ahmed et al., 2014).

A nivel comercial, el cultivo de fresa tiene un rango amplio de adaptabilidad a los pisos térmicos, teniendo un rango de desarrollo óptimo entre 1200 – 2600 msnm y en atmosferas con humedad relativa (HR) baja. Las temperaturas adecuadas en el día deben estar entre los 15 y 18 °C y en las noches de 8 a 10 °C. Al ser un fruto resistente al frio, es importante tener precaución con las denominadas heladas durante la brotación para proteger las coronas de las plantas (Amaya et al., 2016).

1.1.4 Variedades de fresa en Colombia y el mundo

En el ámbito de la comercialización, las variedades de fresa se clasifican en grupos de día corto, neutro o largo como se mencionó antes. Las variedades más cultivadas en Colombia son Albión, camarosa, festival, Chandler, monterrey, camino real, entre otras. De fácil adaptación climatológica, cultivadas en regiones subtropicales húmedas o templadas. En el país es altamente cultivada por su alta productividad y su buena resistencia a factores poscosecha (CORPOICA, 2021).

La variedad Monterrey es una de las más populares y cultivadas en Colombia, es de alta productividad, con un sabor dulce y un tamaño de frutos grandes y uniformes entre 25 y 30 gramos, es de días neutros. Es cultivada en zonas de clima templado como el altiplano cundiboyacense (Agroactiva, 2023).

Por otra parte, existe la variedad “camino real” de día corto, sus plantas son pequeñas, compactas y fáciles de manejar, de frutos grandes, firmes y con colores intensos. Su manejo es exigente pero tolerante a problemas de hongos como (Phytophthora, Verticillium y Antracnosis), pero susceptible a daños por (Botrytis cinerea) (Eurosemillas, 2022).

La variedad Albión se caracteriza por la alta calidad de sus frutos, tanto en tamaño como en sabor y firmeza. Es de fácil recolección y es resistente a actividades poscosecha. En Colombia es la variedad de mayor crecimiento en áreas sembradas y se destaca porque se adapta con facilidad en alturas entre 2500 y 2800 msnm. Es ampliamente aceptada debido a su regularidad en el volumen de producción durante la cosecha. Existen otras variedades relevantes como “San Andreas”, “Portola”, “Ventana”, (MinAgricultura, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2020).

1.1.5 Área cultivada y producción a nivel nacional

De acuerdo con Agrostat (2021), el área sembrada de cultivos de fresa para el año 2021 fue de 1.134 hectáreas. La producción a nivel nacional ha aumentado debido al incremento generalizado de los procesos de siembras y la identificación de la actividad productiva de alta utilidad. La producción de fresa se concentra en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, lo que puede generar según el Ministerio de Agricultura un buen sistema de alianzas y asociatividad útil para este mercado en específico (MinAgricultura, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2020). Colombia es un país con gran potencial de producción hortofrutícola y en el caso de la fresa en específico su potencial es mayor dado a que su producción es continua en el transcurso del año.

1.1.6 Cosecha y poscosecha

En estas etapas de la cadena de producción de la fresa se ven reflejadas las mayores pérdidas de calidad debido al inadecuado manejo de prácticas agrícolas que se manifiestan en daños mecánicos e incremento en el desarrollo de microorganismos patógenos que pueden llegar a afectar directamente la calidad y las características composicionales de los frutos (Hernández & Sandoval, 2018). La cosecha se realiza en las primeras horas de la mañana y los recolectores del producto deben estar equipados con guantes de látex (MinAgricultura, 2014).

En el proceso de recolección, se debe tomar el fruto por el pedúnculo por debajo del cáliz entre los dedos índice y medio; a continuación, se debe girar la mano para desprender el fruto. El momento adecuado para recolectar, depende únicamente del propósito del cultivo. La calidad de coloración para comercialización, es decir, el estándar para el producto nacional permite hasta 1/3 frutos coloreados, sin embargo, este parámetro de color varía de acuerdo con la normatividad de cada país o de la industria objetivo, en el caso de Colombia según la norma (NTC, 2008).

La selección de los frutos a recolectar depende del nivel de maduración aceptado comercialmente definido por el color que ha alcanzado el área superficial del fruto; es importante conocer los parámetros de calidad exigidos en el país o por la zona de destino de comercialización de los frutos. Posteriormente, la clasificación de los frutos se realiza por categorías, según Galindo y Bernal (2015):

Extra, como el estándar máximo de calidad del producto.

Primera, es el estándar máximo de calidad de los frutos donde se clasifica por tamaño y nivel de maduración, libres de imperfecciones y su índice de madurez debe estar entre 4 – 5 y su peso debe ser superior a 30 g unidad.

Segunda, debe cumplir los requisitos básicos, y se acepta cuando representan ligeras deformaciones causadas por mala polinización. Su peso debe estar entre 20 – 30 g unidad.

Tercera, frutos de tamaño mediano que presentan pocas imperfecciones y su índice de madurez está entre 3 – 5. Su peso debe ser entre 15 – 20 g unidad.

Cuarta, los frutos de tamaños pequeños con un índice de madurez entre 3 – 5 y su peso debe ser de hasta 15 g unidad.

Industrial, son todos aquellos frutos que no se clasifican dentro de ninguna categoría y son utilizados en procesamiento industrial.

Luego de la selección, se debe realizar una limpieza cuidadosa para eliminar contaminantes como la tierra, restos de hojas, ramas, insectos, etc.

Las prácticas de manejo poscosecha posteriores son las siguientes:

Enfriamiento: Pasada la limpieza la fresa deben ser enfriadas rápidamente a una temperatura entre (0 y 2 °C) para reducir su tasa respiratoria y prolongar su vida útil.

Almacenamiento: Se deben almacenar en lugares frescos y secos, alejadas de la luz solar directa y protegida contra daños físicos.

Transporte: En esta etapa los frutos de fresa deben ser protegidas contra golpes y vibraciones, y se deben mantener las condiciones de temperatura adecuadas para evitar daños.

Embalaje: Se deben envasar en materiales limpios y seguros para su transporte y comercialización.

Control de calidad: Se deben realizar inspecciones de calidad periódicos para identificar posibles problemas y aplicar medidas correctivas a tiempo.

Los productores y comercializadores deben seguir las prácticas de cosecha y poscosecha para garantizar la calidad e inocuidad de las fresas, para aportar beneficios para la salud de los consumidores y genera rentabilidad de los negocios (López & Hoyos, 2017).

1.1.7 Índices de madurez para recolección y comercialización

Para determinar el momento óptimo de cosecha de los frutos de fresa se utilizan indicies de madurez como (Minagricultura, 2021):

- Grados Brix (solidos solubles totales): De al menos 8 para que los frutos se consideren como maduros.
- La acidez titulable indica que la fresa debe tener un pH de alrededor de 3,5 una acidez titulable de 0,8 % al 1,2 %.
- En cuanto al color es un indicador visual de la madurez y las fresas maduras tienen un color rojo brillante y uniforme.
- La firmeza es un factor importante para la calidad y resistencia al transporte, estas deben ser firmes al tacto, pero no demasiado blandas.
- El aroma de las fresas maduras tiene un aroma dulce y fragante.

Es importante tener en cuenta que el momento óptimo para la cosecha varía según la variedad y las condiciones de cultivo y los objetivos de los productores. Sin embargo, se considera que la fresa esta lista para su recolección cuando alcanza su tamaño máximo y ha madurado completamente.

La clasificación de los estados de madurez, de acuerdo a la norma técnica NTC 4103 (Icontec, 2022) se muestra en la Figura 1.1:

Figura 1.1 Carta de color de la fresa (fragaria ananassa) de acuerdo con su estado de madurez (ICONTEC, 2022).

Estado 0: Fresa verde inmadura, cuando aún no ha comenzado el cambio de coloración.

Estado 1: Fresa blanca, cuando comienza el cambio de color, pero aún no se ha formado la zona rosada.

Estado 2: Fresa con una zona rosada, cuando menos del 30% de la superficie de la fruta ha cambiado de color.

Estado 3: Frutos con una zona rosada que cubre entre el 30% y el 60% de la superficie de la fruta.

Estado 4: Frutos con una zona rosada que cubre entre el 60% y el 90% de la superficie de la fruta.

Estado 5: Frutos completamente maduros, con un color rojo uniforme en la superficie.

Estado 6: Frutos completamente maduros, con un color rojo en toda la corteza.

Esta clasificación varía según la región o el país, y algunos productores pueden tener su propia clasificación de recolección bajo estándares específicos.

1.1.8 Normatividad vigente para el cultivo y comercialización

En Colombia, la normatividad relacionada con el cultivo y la comercialización de fresa se encuentra en varias leyes y decretos mencionándose los más destacados a continuación:

El decreto 1071 de 2015: Que establece las normas sobre los requisitos fitosanitarios para la importación y exportación de productos agricolas y pecuarios en Colombia, incluyendo la frese.

Resolución 1914 de 2017: Establece las normas sanitarias para la producción, procesamiento, almacenamiento, transporte y comercialización de frutas y hortalizas frescas en Colombia, incluyendo la fresa.

Resolución 2767 de 2019: Establece los requisitos técnicos sanitarios para el registro de establecimientos de producción, empaque, almacenamiento y comercialización de productos agricolas y pecuarios en Colombia, incluyendo la fresa.

Decreto 1072 de 2015: Establece las normas sobre seguridad y salud en el trabajo en Colombia, incluyendo las que aplican a los trabajadores en el sector agrícola.

En cuanto a la normatividad que regula el control de plagas y enfermedades en cultivos de fresa, estas son:

Resolución 1376 de 2018: Establece las normas sanitarias para la prevención, control y erradicación de plagas y enfermedades de los vegetales, incluyendo la fresa.

Resolución 2235 de 2005: Establece las normas técnicas para el registro y uso de plaguicidas de uso agrícola en Colombia, incluyendo los utilizados en el cultivo de fresa.

Resolución 1844 de 2018: Establece las normas para la evaluación de la eficacia biológica y la seguridad de los productos de control biológico de plagas y enfermedades de los vegetales, incluyendo la fresa.

Es de gran importancia que los productores de fresa se informen sobre estas normas y las cumplan para garantizar la calidad y la seguridad alimentaria y para proteger al medio ambiente.

1.1.9 Comercialización

La etapa de comercialización del producto hace referencia a los productos o servicios que necesitan los clientes y, que generan utilidades a los productores, procesadores, transportadores y comercializadores. Los canales de comercialización y de distribución son una forma sistémica de conocer el flujo de circulación de un producto desde la región de origen hasta su destino final, es decir, el consumidor (Trujillo & Ligarreto, 2014). El mercado de la fresa en Colombia se centra principalmente en el producto fresco si bien alguna parte de lo que se cosecha se usa para procesos de transformación.

En Colombia, la comercialización de fresa se lleva a cabo a través de diferentes canales, los cuales son los siguientes:

Venta directa al consumidor final: Los productores de fresa pueden vender sus productos directamente, ya sea a través de puestos de venta en la calle, ferias locales, mercados campesinos, tiendas especializadas, entre otros.

Comercialización a través de intermediarios: Estos pueden adquirir las fresas directamente de los productores y venderlas a mayoristas o minoristas, quienes las distribuyen a los mercados y supermercados.

La comercialización en grandes cadenas de supermercados, son los que pueden adquirir grandes volúmenes de producto a los productores o a intermediarios, y distribuirlas en sus tiendas en todo el país.

Exportación: En Colombia se exporta fresa a otros países como Estados Unidos y algunos países de Europa por medio de intermediarios especializados en comercio internacional. Estos tipos de comercialización varían según la región y la temporada de los cultivos.

En la figura 1.2 se muestran los sistemas de empaque utilizados para los diferentes canales de comercialización:

Figura 1.2 Empaques de fresa empleados para el mercado nacional y de exportación (Logihfrutic, 2018).

1.1.10 Métodos para la conservación de frutas frescas

Los procesos de conservación tienen como objetivo principal prolongar la vida útil y conservar su calidad comercial, también sirve como control de la comercialización equilibrando la oferta y la demanda de productos. De forma más sistematizada se busca controlar las velocidades de respiración y transpiración, para disminuir el deterioro metabólico, el desarrollo de microorganismos patógenos alterantes y conservar las propiedades de calidad (García et al., 2016).

Algunos de los métodos de conservación más comunes para el caso de la fresa son:

Refrigeración: Es uno de los métodos más comunes para la conservación de frutas frescas. En el caso de la fresa, las frutas deben almacenarse a temperaturas entre 1 y 4°C correctamente lavadas, sin hojas y completamente secas.

Congelación: Se deben lavar, retirar hojas, secarlas y disponerlas en bandejas, recipientes o bolsas. Las frutas se disponen a una temperatura de mínimo -18°C para obtener un periodo de vida útil de 6 a 12 meses.

Deshidratación: En este método se elimina la humedad para prolongar la vida útil. Se pueden deshidratar en un horno y una vez realizado este proceso se pueden almacenar en recipientes herméticos en lugares frescos y secos.

Conservación en almíbar: Se colocan las fresas en un jarabe de agua y azúcar, se cocinan a fuego lento hasta que se ablanden, luego se envasan en frascos y se cubren con el jarabe. Posteriormente el frasco es esterilizado para obtener una vida útil de varios meses.

1.1.11 Metabolismo

Hace referencia al conjunto de procesos químicos que ocurren en la planta para producir y utilizar energía, de igual forma para sintetizar y degradar los compuestos necesarios para el crecimiento y la reproducción de la planta. El metabolismo de la fresa conlleva varias vías metabólicas, que incluyen la fotosíntesis, la respiración celular y la biosíntesis de compuestos secundarios como los flavonoides y las antocianinas, que son los encargados de darle a los frutos de fresa su color y sabor característico. Además de esto, la fresa utiliza la síntesis de ácidos orgánicos y la descomposición de carbohidratos, proteínas y lípidos para la producción de energía y mantener su metabolismo en funcionamiento (Medina et al., 2017).

En cuanto a la respiración, este es un proceso metabólico en el que las plantas en general oxidan compuestos orgánicos para liberar energía, que se utiliza para producir adenosin trifosfato (ATP), y es esta molécula la encargada de alimentar las funciones celulares. En el caso de la fresa, su respiración es un proceso continuo que ocurre en todas las partes de la planta, como en las hojas, tallos y raíces. En este proceso la fresa consume oxígeno y produce dióxido de carbono, agua y energía en forma de moléculas de ATP (Escobar et al., 2023). La intensidad respiratoria es influenciada por factores ambientales como la temperatura, la humedad o la disponibilidad de oxígeno o nutrientes de los suelos en los

cultivos. Dicha respiración aumenta a medida que la temperatura se incrementa, pero también se ve afectada por otros factores como el estado de madurez y las condiciones de almacenamiento a las que está expuesto el producto (Zhou & Lin, 2019).

La fresa es un fruto climatérico, lo que significa que tiene una etapa de madurez en la que se evidencia un aumento significativo en la intensidad de respiración, lo que acelera su deterioro. Es por esto que debe mantenerse el control de la temperatura y la humedad relativa durante el almacenamiento para evitar la pérdida de calidad comercial o deterioro (Valencia-Villalobos et al., 2016).

Por otra parte, la transpiración es el proceso por el cual las plantas pierden agua en forma de vapor a través de las estomas de las hojas. En el caso de las fresas la velocidad de transpiración es influenciada por factores ambientales como la temperatura, la humedad y la disponibilidad de agua en el suelo. En general, esta velocidad aumenta a medida que la temperatura y la intensidad de la luz aumentan, y disminuye cuando la humedad del aire es alta (Gutiérrez et al., 2016).

1.1.12 Microorganismos causantes de deterioro y perdida de vida útil

Existen varios tipos de microorganismos que pueden causar el deterioro y la pérdida de vida útil de las fresas principalmente mohos y levaduras. Estos pueden causar la descomposición de los tejidos y producir micotoxinas que son perjudiciales para la salud de los consumidores. Los mohos más comunes que pueden crecer en los frutos de fresa son:

Botrytis cinérea: Moho gris, es uno de los principales microorganismos patógenos que afectan a la fresa, se desarrolla en climas húmedos y frescos causando manchas marrones y blandas en la superficie del producto.

Rhizopus stolonifer: Moho negro, causa una textura blanda y descolorida en la superficie de las fresas y producir esporas que pueden propagar la infección a otros frutos cercanos o en contacto.

Alternaria alternata: Puede causar manchas marrones y blandas en la superficie de las fresas y se desarrolla en climas cálidos y húmedos.

Colletotrichum spp: De igual forma que los anteriores puede causar manchas en las superficies de los frutos y se propaga con facilidad en condiciones de alta humedad.

Se debe tener en cuenta que estos mohos pueden interactuar entre sí y con otros microorganismos alterantes presentes, lo que da lugar a una descomposición más rápida y una reducción de la vida útil de las frutas. Es importante que a la hora del almacenamiento este sea en condiciones adecuadas y se debe evitar el contacto entre frutas dañadas y sanas (Peirotén et al., 2013).

Respecto a las levaduras, estas pueden crecer en fresas dada la disponibilidad de azucares y otros sustratos. Las levaduras pueden fermentar los azucares presentes en los frutos, lo que resulta en la formación de alcoholes. Las levaduras más comunes son:

Candida spp: es un género de levadura que puede crecer en amplia variedad de alimentos, incluyendo la fresa. Su presencia en los frutos puede causar olores y sabores desagradables, así como texturas suaves y viscosas.

Rhodotorula spp: Su presencia puede dar lugar a un cambio de color en la superficie de las frutas, que puede pasar de rojo brillante a naranja o amarillo.

Saccharomyces spp: Puede crecer y causar deterioro cuando las fresas se almacenan en condiciones de alta humedad, y da lugar a la formación de alcohol y otros compuestos volátiles que afectan el sabor y el aroma (Ktari et al., 2019).

Otros microorganismos que potencialmente pueden impactar la calidad de los frutos de fresa son las bacterias. Estas pueden producir enzimas que descomponen los tejidos de las fresas, dando lugar a una textura blanda y una apariencia descolorida. Las más frecuentes para este tipo de producto son las siguientes:

Pseudomonas spp: Crece y causa descomposición, su presencia puede dar lugar a la formación de una película viscosa en la superficie de la fruta, de color marrón o verdoso.

Xanthomonas spp: Crece y causa deterioro, puede dar lugar a manchas blandas en la superficie de las fresas y en algunos casos puede causar la pudrición de las mismas.

Erwinia spp: Su presencia puede dar lugar a un cambio de color en la superficie de las frutas, que puede pasar de rojo brillante a marrón oscuro (Alegre et al., 2017).

1.1.13 Características sensoriales y de aceptabilidad por el consumidor

La evaluación sensorial de aceptabilidad de los alimentos frescos o procesados hace parte de las funciones primarias del ser humano. Desde el nacimiento acepta o rechaza un alimento de acuerdo con las sensaciones que experimenta, percibe o le generan al instante de interactuar con los cinco sentidos receptores (vista, oído, olfato, gusto y tacto) al observarlo o ingerirlo (Bello et al., 2018).

La fresa como producto comestible comercial, presenta atributos sensoriales como los siguientes:

Color: La fresa debe tener un color rojo intenso y uniforme en toda la superficie de la fruta.

Aroma: Debe tener un aroma fresco y agradable, característico de la fruta madura.

Sabor: Debe ser dulce, ligeramente ácido y jugoso, con un equilibrio entre dulzor y acidez.

Textura: Debe ser firme y jugosa, sin estar demasiado blanda ni demasiado dura.

Así mismo, entre las características de aceptabilidad al momento del consumo del producto se pueden mencionar las siguientes:

Frescura: El consumidor valora la frescura de los frutos de fresa, prefiriendo las frutas que han sido recolectadas recientemente y que tienen una vida útil prolongada.

Sabor: Es una de las características más importantes, por lo que el consumidor prefiere las frutas de sabores agradables y equilibrados (dulzor – acidez).

Tamaño: Los consumidores prefieren las fresas de mayor tamaño, dado a que esto se asocia a una mayor jugosidad y sabor.

Ausencia de defectos: Se aceptan fresas sin defectos visibles, como manchas o deformaciones. Esto puede ser un indicador de frutas en descomposición o de baja calidad.

Estas características pueden variar dependiendo de la región y la variedad, así como de las preferencias individuales de cada consumidor (Medina et al., 2013).

1.2 Sistemas de empaques

Los envases o empaques son todo elemento que se fabrica con materiales de cualquier naturaleza, usado con el fin de contener, proteger, manipular, distribuir y disponer para transporte y comercialización de un producto. Por otra parte, el embalaje se conoce como

el medio material destinado para proteger un conjunto de empaques o envases en el cargue, transporte y descargue, para la conservación en bodegas o almacenes (Segura, 2017).

Los empaques se clasifican en empaques primarios, secundarios y terciarios, cada uno de ellos cumple una función diferente. La función técnica de un empaque y del embalaje es la de contener, proteger, conservar, comunicar, almacenar y distribuir. Por otra parte, la función del empaque en el mercado es la localización e identificación, brindar información y atraer al consumidor. En el momento de seleccionar un empaque para un alimento procesado o no, se debe tener en cuenta el tiempo de protección necesario del alimento, de acuerdo con sus necesidades de protección (Soroka, 2002).

1.2.1 Empaques para productos hortofrutícolas frescos

El empaque juega un papel importante en la vida útil de los alimentos, proporcionando una barrera simple a la influencia de factores intrínsecos y extrínsecos asociados al deterioro (Aguilar & Arriaga, 2019). El objetivo principal de un empaque para productos hortofrutícolas frescos es protegerlos de daños mecánicos, contaminación química, microbiológica, del oxígeno, vapor de agua y la luz solar, mientras preserva sus propiedades de calidad en el mayor tiempo posible (FAO, Food and Agriculture Organization , 2020).

La durabilidad de los alimentos frescos es influenciada por las condiciones de la atmosfera que lo rodea, cuando se tienen bajos niveles de oxígeno (2 – 5 %) y moderados niveles de dióxido de carbono (5 – 20 %) se puede reducir el metabolismo e incrementar la vida útil. Sin embargo, si los niveles de dióxido de carbono son muy altos o hay agotamiento de oxígeno, se puede dar lugar al desarrollo de procesos anaeróbicos y rápida pudrición del producto empacado (Arana & Hernández, 2018).

Para la conservación de frutas y vegetales frescos se utilizan empaques como:

Bandejas de plástico: Utilizados en productos que no necesitan refrigeración, como tomates, zanahorias, pepinos, entre otros. De color transparente para que el consumidor logre ver los productos.

Bolsas de plástico: Utilizadas para productos que se venden a granel, como fruta y verduras. Pueden ser transparentes o de colores y pueden tener pequeños agujeros para permitir la ventilación.

Cajas de cartón: Utilizadas en productos que necesitan refrigeración, como lechugas, espinacas, frutas, etc. Suelen tener agujeros para permitir la ventilación y refrigeración.

Envases de poliestireno expandido: conocido como corcho blanco, se utiliza en productos que necesitan alta protección, como frutas delicadas como las uvas o productos que se dañan con facilidad.

Mallas: Utilizados en alimentos que necesitan ser protegidos y ventilados al mismo tiempo, como cebollas, ajos, naranjas, entre otras.

Los empaques deben ser adecuados para el tipo de producto y las condiciones de transporte y almacenamiento para mantener su calidad y frescura (Miró, 2017).

1.2.2 Empaques para fresa

El empaque utilizado para la comercialización de fresa en fresco puede variar según la necesidad de los productores, la temporada y los requisitos de los clientes. Algunos de los empaques más comunes son:

Cajas de cartón: Es uno de los empaques más usados para este producto, se pueden encontrar cajas de diferentes tamaños y capacidades, desde cajas pequeñas de una sola capa hasta cajas grandes y resistentes de varias capas. Elaboradas con cartón corrugado, que es más resistente y duradero, o de cartón plegable, que es más ligero y económico.

Bandejas de plástico: De diferentes tamaños y formas, se utilizan para empaquetar fresas en pequeñas proporciones. Están elaboradas de poliestireno o polipropileno.

Contenedores de plástico: Son una opción popular para el envasado de fresas en fresco que se venden en grandes cantidades, de diferentes tamaños y capacidades para transportar producto a largas distancias.

Bolsas de plástico: Son una opción práctica, se pueden encontrar en diferentes tamaños y capacidades, desde bolsas pequeñas o grandes para varias libras o kilogramos de fresa. Elaboradas de polietileno.

Estos empaques deben ser resistentes y capaces de proteger las fresas durante el transporte y almacenamiento. Además, es importante que los empaques sean atractivos y fáciles de manejar para los consumidores (López-Valencia & Ciro-Velásquez, 2018).

1.2.3 Sistemas de empaques activos

En la actualidad los sistemas de empaques activos se han dado a conocer debido a la creciente demanda de los consumidores por adquirir alimentos con mayor calidad, teniendo en cuenta que los empaques tradicionales no cuentan con la seguridad y protección suficiente para reducir el deterioro causado por la actividad de microorganismos patógenos alterantes, alto contenido de humedad y elevada producción de etileno (Arévalo et al., 2018). Es por esto que se han propuesto estudios en donde se involucran componentes dentro del empaque específicamente pensados para mantener las propiedades de calidad de los alimentos sin tener que recurrir a la inclusión de preservantes mezclados en el propio alimento.

Un empaque activo es aquel que logra proteger al alimento, prolongando su vida útil y reduciendo el riesgo de contaminación por microorganismos patógenos alterantes al incorporar un elemento que interactúa directamente con el producto empacado. De forma teórica es un sistema donde un fenómeno físico y químico permite neutralizar de manera eficiente el deterioro que pueda ser causado por alguna sustancia indeseable sobre el alimento, como el oxígeno, la humedad, la producción de dióxido de carbono, otros volátiles, y también microorganismos presentes en el interior del empaque (Cerqueira et al., 2017).

En el sistema de empaque, el elemento activo se incorpora en el interior junto con el producto, pero en lo posible sin entrar en contacto directo con este. El elemento activo puede incorporarse de forma independiente al empaque usando un medio apropiado como almohadillas, laminas o etiquetas o puede incorporarse directamente en el empaque fijado en las paredes a modo de compuesto o de recubrimiento (Torres-Giner & Lagarón, 2017). Así mismo, la sustancia con características activas puede estar fija en el elemento activo o puede ir migrando controladamente hacia el interior del sistema en donde puede ir ejerciendo su actividad preservante. Entre las principales sustancias que se emplean en empaques activos se encuentran adsorbentes de humedad, removedores de oxígeno, etileno o dióxido de carbono, compuestos con características antimicrobianas o antioxidantes y mejoradores de flavor (Suppakul et al., 2003).

1.2.4 Ventajas de los sistemas de empaques activos

Ayudan a prolongar la vida útil de las frutas, al reducir la respiración, la maduración y la pérdida de peso.

Permiten mantener las propiedades de calidad como textura, sabor y apariencia al controlar la presencia de componentes causantes de deterioro como el oxígeno, el etileno y la humedad.

Incrementan la protección contra el deterioro microbiano, al incluir sustancias antimicrobianas o antioxidantes que ayudan a prevenir el crecimiento de hongos o bacterias que puede afectar directamente la calidad de los frutos.

Aumentan el atractivo visual de las frutas lo que las hace más atractivas para el consumidor.

1.2.5 Desventajas de los sistemas de empaques activos

Son más costosos que los sistemas de empaques convencionales.

Se incrementa la complejidad en el proceso de empacado, al requerir más equipos y etapas de proceso.

Aumenta el riesgo de seguridad para el consumidor pues algunos de estos sistemas pueden incluir sustancias químicas que pueden ser perjudiciales para la salud si no se realiza un correcto manejo.

Hay mayores limitaciones ya que algunos de estos sistemas no son aptos para todas las frutas, debido a que cada una de estas tienen diferentes requisitos de almacenamiento o maduración.

1.2.6 Empaques con atmosferas modificadas

La técnica de conservación de alimentos con atmosfera modificada (AM) consiste en conservar alimentos en empaques que usen materiales con barreras especificas a la permeación de gases, de tal forma que el nivel de estos últimos sea modificado dentro del empaque para que el grado de respiración disminuya, se reduzca el crecimiento microbiano, se retrase el deterioro enzimático y se extienda finalmente la vida útil del alimento empacado (Castrillo et al., 2018).Se pueden configurar atmosferas con ambientes ricos en dióxido de carbono y con escaso oxígeno, para reducir los procesos de respiración,

conservando las características fisicoquímicas, organolépticas y microbiológicas por más tiempo. Esta técnica implica la eliminación del aire del interior del empaque y su sustitución por una mezcla de oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua y nitrógeno estable en el tiempo y adecuada para la mejor preservación del alimento (Garavito et al., 2022).

1.3 Adsorbentes de humedad

Este tipo de elementos para empaques activos son diseñados para proteger diferentes tipos de alimentos en fresco por lo general de los efectos negativos de la humedad, la oxidación, la corrosión y el crecimiento de microorganismos patógenos alterantes como los hongos y las bacterias. Dichos empaques están elaborados de materiales que tienen capacidad de adsorber la humedad del ambiente, manteniendo así los alimentos secos y protegidos (Calvo & Rojas-Grau, 2018).

Los adsorbentes de humedad en la industria de los alimentos son utilizados para reducir el contenido de humedad y de este modo ayudar a prevenir el deterioro y la proliferación de microorganismos. Su objetivo es absorber y retener la humedad presente en el aire del entorno evitando que dicha humedad sea absorbida por el alimento. Los adsorbentes de humedad son comúnmente utilizados en alimentos con alto contenido de agua con alta susceptibilidad al deterioro, como frutas, verduras, carnes y algunos productos horneados como panes (Kyriacou & Rouphael, 2018). Además de las funciones principales mencionadas anteriormente, los adsorbentes pueden ayudar a mejorar la textura y la calidad sensorial al reducir la cantidad de humedad presente. Se debe tener en cuenta que el uso excesivo de los mismos puede conllevar un efecto negativo en el sabor de los alimentos, por lo que se deben utilizar cantidades moderadas combinadas con otras técnicas de conservación (Wang et al., 2015).

De acuerdo con Jaramillo et al., (2018) los adsorbentes de humedad utilizados en la industria alimentaria en la actualidad, se encuentran el gel de sílice, las zeolitas, las arcillas, el carbonato de calcio y la alúmina activada. Aunque son elementos seguros para su uso en la industria alimentaria, es necesario cumplir con las regulaciones y normas de seguridad alimentaria para su aplicación

Estos materiales de adsorción se pueden clasificar en diferentes categorías según su naturaleza y modo de acción, la clasificación más común es la siguiente (Duque et al., 2019):

Adsorbentes físicos: Se basan en la adsorción física de la humedad en la superficie. Estos como el gel de sílice, las arcillas, el carbón activado y la zeolita.

Absorbentes químicos: Se basan en una reacción química entre el absorbente y la humedad, como el cloruro de calcio, el cloruro de litio y el sulfato de hierro.

Higroscópicos: Están en la capacidad de absorber la humedad directamente del aire de acuerdo con su naturaleza química. En estos se incluyen el ácido bórico y el ácido sulfúrico.

Humectantes: Ayudan a retener la humedad en los alimentos al aumentar la actividad acuosa. Los más importantes son la glicerina, el sorbitol y el propilenglicol.

Agentes antiaglomerantes: Usados para prevenir la formación de grumos en los alimentos a causa de la humedad. Algunos de estos como la celulosa microcristalina, el carbonato de calcio y los almidones.

Las arcillas son un tipo de material utilizado para la absorción de humedad y para mejorar la estabilidad de los alimentos. Las más comunes y utilizadas en la industria son:

Arcilla caolín, conocida también cono arcilla china, de color blanco, suave, utilizada en la fabricación de porcelanas, papel, cosméticos y productos farmacéuticos.

Arcilla bentonita: De grano fino encontradas en depósitos alrededor del mundo. Utilizada ampliamente en la industria de la belleza y la industria alimentaria y las bebidas.

Arcilla verde: Compuesta por hierro y magnesio. Utilizada por sus propiedades purificantes y desintoxicantes.

1.3.1 Bentonita

Es una arcilla compuesta naturalmente por montmorillonita, un mineral del grupo de las esmectitas. Encontradas en depósitos alrededor del mundo y más abundante en las regiones volcánicas. Es usada en la industria de los alimentos y bebidas como agente clarificante para eliminar impurezas y sedimentos, también para mejorar la textura y la estabilidad. Usado como adsorbente de iones en solución, así como en grasas, aceites y

también como adsorbente de humedad (Zhang et al., 2020). Su fórmula química es (SiO_3*H_2O) compuesta por 92 % de montmorillonita, 3 % de cuarzo y 5 % de feldespato (De Mello et al., 2019). Compuesta principalmente por silicatos de aluminio hidratados (montmorillonita): óxidos de hierro, óxidos de magnesio, óxidos de calcio, óxidos de sodio, óxidos de potasio. También puede contener trazas de otros minerales y elementos como titanio, cromo, cobalto y níquel. Sus proporciones varían de acuerdo con la fuente de la bentonita (Martínez et al., 2016).

Aparte de su uso como adsorbente dadas sus características físicas, la bentonita puede ser utilizada como matriz para la liberación controlada de sustancias. Zhang et al., (2020) por ejemplo, utilizaron nanocompuestos de bentonita y alginato para la liberación controlada de imidacloprid, un agente tóxico para el control de insectos.

1.4 Agentes antimicrobianos

El uso de agentes antimicrobianos o preservantes es una práctica ampliamente utilizada en la industria de los alimentos. Tradicionalmente, se han utilizado agentes antimicrobianos sintéticos y se ha encontrado la necesidad de reemplazarlos por agentes de origen natural para sustituir a los tradicionales debido a las nuevas apetencias del mercado y la concientización de los consumidores (López-Brea, 2003). Generalmente los agentes antimicrobianos se obtienen de hierbas, plantas y especias, aunque su proceso de extracción, purificación y aplicación puede ser dispendioso (Páez et al., 2017). La actividad antimicrobiana de las plantas es principalmente atribuida a los compuestos fenólicos presentes en los extractos o aceites esenciales que las componen (Quispe et al., 2017). La limitante principal en el uso de compuestos antimicrobianos es su impacto en las características sensoriales del producto, y muchas veces el límite máximo de aplicación estará dado por la aceptabilidad sensorial del consumidor (Aguilar et al., 2017).

Los agentes antimicrobianos naturales tienen la capacidad de prevenir e inhibir el crecimiento prolongado de microorganismos. Algunos de los más usados en la industria alimentaria son los siguientes (Rodríguez Sauceda, 2011).

Ácido ascórbico: Vitamina C, antioxidante natural utilizado para prevenir la oxidación y el crecimiento de bacterias en los alimentos.

Ácido acético: El vinagre, es un ácido orgánico utilizado como conservante y agente antimicrobiano en los alimentos.

Aceites esenciales: Son compuestos aromáticos naturales extraídos de las plantas y que presentan propiedades antimicrobianas. Algunos de estos son el aceite de orégano, de clavo y el aceite de canela.

Sal: El típico conservante natural utilizado hace siglos para preservar y prevenir el crecimiento de microorganismos.

Bacteriocinas: son proteínas antimicrobianas producidas por cepas de bacterias beneficiosas utilizadas para el control del crecimiento de microorganismos no deseados en los alimentos.

1.4.1 Aceites esenciales en la conservación de frutas en fresco

Los aceites esenciales son extractos derivados de plantas y se conocen por su actividad antimicrobiana contra hongos y bacterias (Martínez et al., 2003). Son líquidos aceitosos obtenidos de las flores, yemas, semillas, ramas, hojas, cortezas, hierbas, frutos y raíces. Los aceites esenciales son mezclas complejas de esteres, aldehídos, terpenos y cetonas (Vargas et al., 2019). También están conformados principalmente por hidrocarburos terpénicos, como el limoneno, el pineno y el terpineno, que le dan el denominado aroma característico (Ruiz et al., 2015). Son compuestos poco polares, muy solubles en alcohol y poco solubles en agua. Los compuestos volátiles son los responsables del olor característico y poseen estructuras químicas de grupos funcionales de los mencionados anteriormente aldehídos, cetonas y esteres (Ballester et al., 2017).

A parte de los compuestos volátiles generadores del aroma, algunos aceites esenciales poseen uno o varios compuestos con características antimicrobianas. Algunos de estos compuestos activos son encontrados en los aceites esenciales de orégano (carvacrol), clavo (eugenol), canela (cinamaldehído), tomillo (timol) y limón (citral) (Chaves et al., 2014).

El efecto antimicrobiano que causa el componente activo de cada uno de los aceites esenciales en su extracto natural es que actúan sobre las membranas celulares de los microorganismos inhibiendo su crecimiento y propagación, o por otra parte interfiriendo en su metabolismo y funciones vitales (Páez et al., 2017).

- **Aceite de canela (cinamaldehído)**

El aceite esencial de canela es una sustancia con carácter aromático que se obtiene de la corteza o las hojas de los árboles de canela a través de un proceso de destilación por arrastre de vapor (Krisch, 2011). La canela es originaria de Sri Lanka, pero es cultivada alrededor del mundo. Es conocida por su aroma cálido y especiado. Posee propiedades antimicrobianas, antioxidantes y antinflamatorios. Aunque se ha demostrado que el aceite esencial de canela o su compuesto activo, el cinamaldehído, son efectivos antimicrobianos, su uso en alimentos frescos debe ser cuidadosamente regulado porque a altas concentraciones puede llegar a ser tóxico y puede llegar a afectar el sabor y el aroma de los alimentos reduciendo su aceptabilidad (Rodríguez et al., 2019).

El componente en mayor proporción en el aceite esencial de canela es el cinamaldehído, responsable de su aroma y sabor característico. Su composición química es (C9H8O), tiene un peso molecular de 132.16 g/mol y es perteneciente a la clase de los aldehídos. Es un líquido amarillo pálido con un olor dulce y especiado. Tiene un punto de fusión de -8 °C y un punto de ebullición de 246 °C. Es insoluble en agua, pero soluble en disolventes como el etanol. Al ser un aldehído no saturado, es susceptible a reacciones de adición de hidrogeno y oxidación (Choi & Kim, 2019).

Existen estudios donde se comparan las propiedades antimicrobianas del cinamaldehído libre o nano-encapsulado aplicado en superficies de ácido poliláctico (PLA). En el estudio se obtuvo una actividad antimicrobiana significativa contra *Escherichia coli* y *Bacillus cereus* (Rodríguez et al., 2019). Respecto a su efecto en hongos causantes de deterioro, se evaluó la inclusión de cinamaldehído en empaques activos para frutos de uchuva *(Physalis peruviana)*. En este caso el cinamaldehído fue incluido en sachet de algodón en una matriz de bentonita para facilitar su liberación controlada probándose un buen efecto antifúngico contra *Botrytis cinerea* (Cortés L et al., 2023).

- **Aceite de clavo (eugenol)**

Es un derivado fenólico encontrado en las semillas de pimienta, las hojas de laurel, la canela, el alcanfor y otros aceites (Valdés-Pérez et al., 2016). De color amarillo claro, consistencia liquida y aceitosa y con un aroma característico, el aceite esencial de clavo es poco soluble en agua y soluble en alcohol (Kurekci & Padmanabhan, 2021). Se ha demostrado que presenta una actividad antimicrobiana importante contra bacterias y

hongos (Montes, 2009) Se clasifica como sustancia GRAS (generalmente reconocida como segura de acuerdo con la Administración de Alimentos y Medicamentos FDA) y ha sido aprobado como aditivo de grado alimentario. Dentro de las limitaciones que presenta su aplicación se encuentra su fuerte carácter lipofílico, alta volatilidad y fácil deterioro por factores ambientales como la luz o el oxígeno, lo que lo convierte en un producto difícil de incorporar en la industria de los alimentos (Gutiérrez-Pacheco & Ponce-García, 2019).

El eugenol es el componente activo principal en el aceite esencial de canela. Es un bactericida a altas concentraciones (10 ± 3 mol/L). Una exposición breve a 10,2 mol/L elimina las células de mamíferos. El clavo de olor tiene una concentración de isoeugenol entre 5-10 %, lo que corresponde a 33-66 µmol por g de planta (Burt, 2004).

- **Aceite de menta (mentol)**

El aceite esencial de Menta Piperita es obtenido por arrastre de vapor, producido espontáneamente en regiones templadas de Europa. Es un híbrido estéril obtenido en el cruce de la menta acuática y la hierbabuena (Gelal, 2008). Es una hierba perenne de la familia de las labiadas de hasta 90 cm. Su aspecto al ser producido es el de un líquido transparente de color amarillo a amarillo pálido, de olor característico, fresco y mentolado. De acuerdo a su composición química su principio activo es el menthol (30-35 %) (Solís et al., 2017)

El mentol es un alcohol secundario saturado encontrado en aceites de diferentes especies de la menta, como *Mentha Arvensis* y *Menta Piperita.* Es un compuesto orgánico que se obtiene de forma sintética o natural con la propia menta. Se comprende de una sustancia cristalina cerosa, clara o de color blanco solida a temperatura ambiente y se funde alrededor de los 40°C. Según la nomenclatura IUPAC se denomina 2-isopropil-5-metilciclohexanol y su fórmula molecular es $C_{10}H_{20}O$ (Rodriguez Sauceda, 2011).

Según varios estudios se ha demostrado que el mentol tiene propiedades antimicrobianas, teniendo como mecanismos de acción la desestabilización de la membrana celular, la interferencia en la síntesis de ADN, alteraciones en la permeabilidad celular e inhibición de algunas enzimas (Ortega et al., 2020) Es por esto que se realizan estudios para validad la eficiencia de estos integrados en frutos pequeños para inhibir o disminuir el crecimiento de microorganismos patógenos causantes de deterioro (Davidson, 2001).

Capítulo 2. Determinación de la influencia del O_2 y CO_2 sobre la velocidad de respiración y deterioro de frutos de fresa en fresco a diferentes temperaturas de almacenamiento

Resumen

En este capítulo, inicialmente se presentaron los estudios realizados para determinar las cinéticas de respiración de los frutos de fresa a diferentes temperaturas y en función de las fracciones molares de O_2 y CO_2. Posteriormente se hicieron ensayos de almacenamiento a 4 y 20°C empacando los frutos en bandejas termoselladas de ácido poliláctico (PLA) las cuales fueron configuradas con perforaciones de diferentes tamaños con el fin de obtener concentraciones estables de O_2 y CO_2 en un sistema de atmosferas modificadas. A partir de estos estudios se determinaron las concentraciones más favorables para la preservación del producto y por ende el tamaño de perforación adecuado en el empaque termosellado de PLA.

2.1 Materiales

2.1.1 Material vegetal

Los frutos de fresa variedad “Albión” se obtuvieron directamente de la Corporación de Abastos de Bogotá, Colombia (Corabastos). Teniendo en cuenta la información verídica del vendedor, el material vegetal fue cultivado y recolectado de cultivos ubicados en el municipio de Sibaté en el departamento de Cundinamarca (Coordenadas: Latitud 4° 29’ 30” Norte – Longitud 74° 15’ 30”, temperatura media de la zona de 6 (min.) a 20 (max.) °C, humedad relativa media 88% y altitud de 2.574 msnm). Se recolectaron frutos en el estado de madurez 5 de acuerdo a la norma técnica NTC 4103. Las muestras se compraron dentro de 24 - 48 horas de su recolección en el campo y luego de su compra se transportaron inmediatamente al Laboratorio de Empaques y Vida Útil de Alimentos de la Universidad

Nacional de Bogotá, Sede Bogotá. Una vez ingresados los frutos al laboratorio, se descartaron todos aquellos con evidencia de daños mecánicos o magulladuras y se seleccionaron para el ensayo todos aquellos frutos con un color rojo homogéneo de aspecto fresco y consistencia firme de acuerdo al estado de madurez seleccionado. No se realizó proceso de limpieza y desinfección debido al daño y estrés mecánico generado por exceso de manipulación y acumulación excesiva de humedad. Una vez seleccionadas las muestras, se dispusieron en diferentes grupos de acuerdo a los ensayos a realizar.

2.1.2 Materiales de empaque

Se usaron canastillas tipo “clamshell” de tereftalato de polietileno de la marca Darnel ® (Darnel Ajover S.A.S., Bogotá, Colombia) con dimensiones de 12 x 14 x 6,5 cm y 0.35 ± 0.01 mm de espesor. En la parte superior de la bandeja se hizo un corte en forma de cuadrado en el cual se selló una película de ácido poliláctico (PLA) (ClearBags, El Dorado Hills, CA, USA) de 8,5 x 6,5 cm de diámetro y 0.035 ± 0.002 mm de espesor como se muestra en la Figura 2.1 y de forma similar al estudio realizado por (Cortés et al., 2023). El PLA se colocó para permitir que la transferencia de gases se diere exclusivamente a través de la película y reducir la acumulación de vapor de agua en el interior debido a la mayor permeabilidad del PLA (Garavito et al., 2022). La hermeticidad del selle de las películas de PLA en las bandejas se verificó haciendo una prueba de inmersión en una tina de agua.

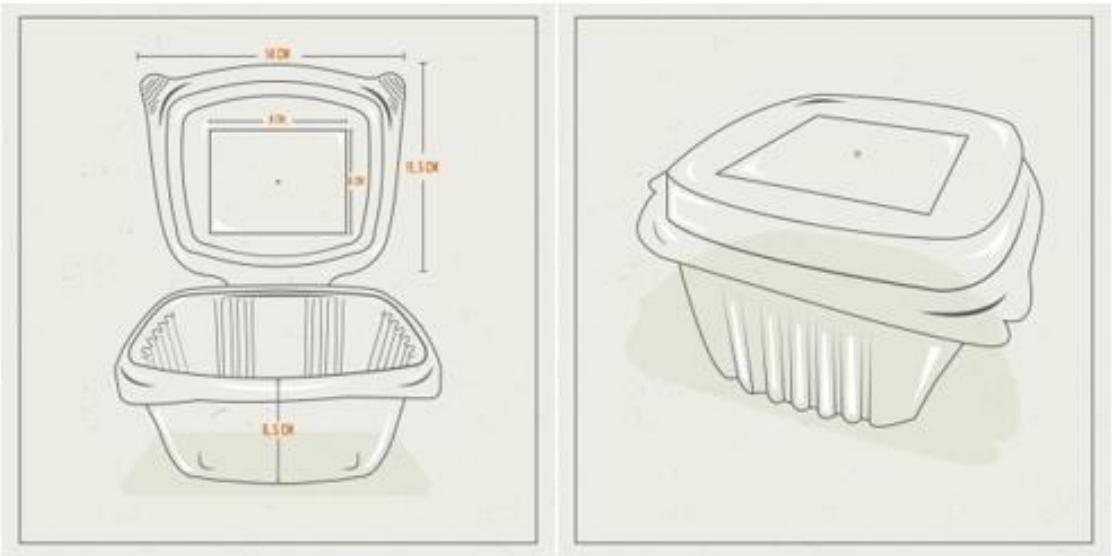


Figura 2.1 Diseño empaque tipo "clamshell" de tereftalato de polietileno con abertura en tapa sellada con película de PLA. Fuente propia.

2.2 Metodología

2.2.1 Pruebas experimentales de respiración

Para las pruebas de respiración se utilizaron recipientes rígidos con cierre hermético y un volumen interno de 2.200 cm^3. Con el fin de determinar el cambio en los niveles de gases del espacio de cabeza de cada recipiente, estos estuvieron equipados con una abertura circular en la parte superior en la tapa la cual se cubrió con un sello de caucho expandible y encima por un septo adhesivo de goma. Las muestras de gas en el interior del recipiente se tomaron pinchando con una aguja a través del sello y el septo de goma.

En cada recipiente hermético se colocaron 350 g de fresa fresca y luego se cerraron herméticamente almacenándolas en una cámara climática a tres diferentes temperaturas: una de refrigeración a 3°C, una intermedia de 10°C y una a ambiente de 20°C. Previo al ensayo, las frutas se aclimataron durante 20 minutos a la temperatura de evaluación manteniendo los recipientes con la tapa abierta en el interior de la cámara climática.

El seguimiento de los niveles de O_2 y de CO_2 se realizó utilizando un analizador electrónico de gases (Dansensor, CheckPoint 3S Premium (Mocon Ametek, Brooklyn Park, USA) midiendo a intervalos regulares de tiempo hasta que el nivel de O_2 se redujo a un mínimo de 3 a 4 % (v/v) con el fin de no provocar procesos de respiración anaeróbica. En cada medición se tomó una muestra de 4-5 ml de gas del espacio de cabeza de cada recipiente y posteriormente se introdujo una cantidad similar de aire para mantener la presión total aproximadamente constante en el interior (Garavito et al., 2022). Los niveles de O_2 y CO_2 se reportaron en fracciones molares como el valor promedio de 3 réplicas.

2.2.2 Determinación experimental de la cinética de respiración de consumo de oxígeno (O_2) y la producción de dióxido de carbono (CO_2).

Luego de la recolección de los datos de fracciones molares de O_2 y CO_2 se estimaron las velocidades experimentales de consumo de O_2 y producción de CO_2 a partir de las ecuaciones descritas por Garavito et al., (2022):

Para las velocidades en t = 0,

Consumo de O_2

$$r_{CO_2}(t=0) = -(V/W)\left(-3y_{O_2 t=0} + 4y_{O_2 t+1} - y_{O_2 t+2}\right)/(t_{+2}) \quad (1)$$

Producción de CO_2

$$r_{CO_2}(t=0) = (V/W)\left(-3y_{CO_2 t=0} + 4y_{CO_2 t+1} - y_{CO_2 t+2}\right)/(t_{+2}) \quad (2)$$

Para las velocidades t > 0

Consumo de O_2

$$r_{O_2}(t) = (V/W)\left(y_{O_2 t-1} - y_{O_2 t+1}\right)/(t_{+1} - t_{-1}) \quad (3)$$

Producción de CO_2

$$r_{CO_2}(t) = (V/W)\left(y_{CO_2 t+1} - y_{CO_2 t-1}\right)/(t_{+1} - t_{-1}) \quad (4)$$

En las ecuaciones 1 – 4, r_{O2} y r_{CO2} son las velocidades de respiración en cm^3 de O_2 o CO_2 por kg de fruto por día (cm^3 kg^{-1} d^{-1}); V (cm^3) es el volumen libre del empaque; W (kg) es el peso de las muestras de fruta; t (d) es el tiempo; t_{+1} y t_{-1} son los tiempos precedentes y subsecuentes a un tiempo t de medición; y_{O2} y y_{CO2} son las fracciones molares de O_2 y CO_2 obtenidas en el tiempo. Los datos estimados de velocidades se compilaron para cada una de las temperaturas evaluadas en función de las fracciones molares de O_2 y CO_2.

2.2.3 Ajuste de un modelo cinético de respiración

Para representar las cinéticas de respiración, de consumo de O_2 y producción de CO_2 a las tres temperaturas evaluadas se utilizó un modelo enzimático de Michaelis-Menten; con inhibición anticompetitiva por CO_2 teniendo en cuenta la naturaleza enzimática de la respiración de acuerdo con lo evaluado en estudios previos para otras frutas (Escobar et al., 2023).

La cinética de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2 se representa con las ecuaciones 5 y 6. En este modelo cinético, la acumulación de CO_2 en el espacio de cabeza del sistema inhibe y reduce la velocidad de respiración (Garavito et al., 2022).

Consumo de O_2

$$r_{O_2} = \frac{r_{O_{2max}} y_{O_2}}{K_{m_{O_2}} + y_{O_2}\left(1 + \frac{y_{CO_2}}{K_{mu_{CO_2}}}\right)} \quad (5)$$

Producción de CO_2

$$r_{CO_2} = \frac{r_{CO_{2max}} y_{O_2}}{K_{m_{CO_2}} + y_{O_2}\left(1 + \frac{y_{CO_2}}{K_{mu'_{CO_2}}}\right)} \quad (6)$$

En las ecuaciones 5 y 6, rO_2 corresponde a la velocidad de consumo de O_2 y rCO_2 corresponde a la velocidad de producción de CO_2 desde el fruto respectivamente, r_{O2max} y r_{CO2max} son los valores máximos de las velocidades, K_{mO2} y K_{mCO2} son las constantes de Michaelis en cada caso y K_{muO2} y K_{muCO2} representan las constantes de inhibición por CO_2 en cada cinética.

El efecto de la temperatura en las cinéticas de respiración, fue representando a partir del cambio en los parámetros cinéticos de los modelos de Michaelis-Menten en función de la temperatura usando ecuaciones de Arrhenius. Para la velocidad máxima de consumo de O_2 por ejemplo, la dependencia con respecto a la temperatura se representa de la siguiente forma (Escobar et al., 2023).

$$r_{O_{2max}} = r_{O_{2max,ref}} e^{-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)} \quad (7)$$

Donde r_{O2max} es la velocidad máxima de consumo de O_2; $r_{O2max,\ ref}$ es la velocidad máxima a una temperatura de referencia T_{ref} (296,15 K); E_a es la energía de activación (kJ mol^{-1}); R es la constante universal de los gases (0,00834 kJ mol^{-1} K^{-1}) y T es la temperatura del ensayo. Para cada uno de los parámetros de las ecuaciones 5 y 6 se planteó una ecuación similar a la 7. Los diferentes parámetros de las ecuaciones 5 y 6 fueron estimados a partir del ajuste de los datos experimentales generados a cada temperatura minimizando la suma de los errores residuales y maximizando el coeficiente de determinación ajustado R^2_{adj}. Una vez ajustados los parámetros para el modelo cinético (Michaelis-Menten simple con inhibición anticompetitiva por CO_2) se determinó el comportamiento experimental de la

respiración de los frutos de fresa. Con el ajuste de la cinética fue posible cuantificar la velocidad de consumo de O_2 y producción de CO_2 de los frutos a diferentes condiciones de temperatura y niveles de O_2 y CO_2. Esto sirvió de base para configurar un sistema de atmosferas modificadas apropiado para la fresa con niveles bajos de O_2 y moderados de CO_2 (Garavito et al., 2022).

2.2.4 Efecto de los niveles de oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2) en la preservación de frutos de fresa a diferentes temperaturas de almacenamiento.

Para evaluar el efecto de los niveles de O_2 y CO_2 en el deterioro de la fresa se configuró un sistema de empaque con atmosferas modificadas basado en un empaque de permeabilidad a gases restringida. Para esto se empacaron 215 g (7 u 8 unidades de frutas) de fresa en canastillas de ácido poliláctico – PLA (Envaseko Ekologic Food Packaging, Areso, España) las cuales fueron termoselladas con una película de PLA (ClearBags, El Dorado Hills, CA, USA) de 0.035 ± 0.002 mm de espesor en la parte superior. Con el fin de crear diferentes atmósferas modificadas con varios niveles de O_2 y CO_2 y a su vez para seleccionar la combinación de concentraciones más satisfactoria, se realizó una única perforación en el centro de la película de PLA utilizando agujas con diámetros de 804, 545, 405 y 260 µm respectivamente. Los diámetros fueron verificados utilizando un microscopio óptico Olympus® CX31 (Olympus Co., Tokio, Japón). Como tratamiento de control se empacaron frutos en bandejas termoselladas sin perforar.

Una vez dispuestos los frutos en las canastillas selladas de PLA, estas se almacenaron a dos condiciones: refrigeración a 3°C y 75% de humedad relativa (HR) y ambiente a 20°C y 60% de HR. A lo largo del periodo de almacenamiento se realizó el seguimiento visual de la aceptabilidad de los frutos y de la evidencia de contaminación fúngica. Una vez detectada contaminación fúngica en alguna de las frutas empacadas se descartó la canastilla determinando antes la concentración de O_2 y CO_2 en el espacio de cabeza del empaque para verificar los niveles de estos gases en el sistema de empaque. De este modo se evaluó el tiempo de preservación de los frutos empacados con los diferentes tamaños de perforación y a su vez, los niveles de gases más adecuados para la preservación seleccionando el tamaño más apropiado para las pruebas de empaque posteriores. Para cada tamaño de perforación y para las bandejas de control se utilizaron 4 réplicas a cada una de las dos condiciones de temperatura evaluadas.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Cinéticas de respiración e influencia del O_2 y CO_2 a diferentes temperaturas de almacenamiento

En la Figura 2.2 se muestran los recipientes herméticos utilizados para las pruebas de respiración con frutos en su interior. Los cuales fueron almacenados a las diferentes temperaturas haciendo el seguimiento en los cambios de O_2 y CO_2 en el espacio de cabeza del sistema.

Figura 2.2 Montaje para la evaluación experimental de la respiración de frutos de fresa fresca.

En la Figura 2.3 se muestra la evolución en los niveles de O_2 y CO_2 para los frutos en los recipientes herméticos a las diferentes temperaturas evaluadas. Se observa en todos los casos una reducción paulatina en el nivel de O_2 y un incremento sostenido en el nivel de CO_2 hasta el final de cada ensayo. A 3 °C el cambio en los niveles de gases fue lento alcanzando valores de y_{O2} = 0,066 y y_{CO2} = 0,126 para el día 6 (144 h) lo que indica un consumo de casi 2/3 del nivel inicial de O_2 para este día. Por otra parte, a 10 °C se alcanzaron niveles similares de gases en menos de dos días. En el día 1,9 (45,6 h) se registraron valores de y_{O2} = 0,069 y y_{CO2} = 0,105. La mayor velocidad de cambio en los niveles de gases correspondió a 20 °C en donde se registró un agotamiento del nivel de O_2 en menos de un día. A 0,9 d (21,6 h) se obtuvieron valores de y_{O2} = 0,0086 y y_{CO2} = 0,162. La temperatura influye claramente en la cinética de respiración de los frutos de fresa lo que debe tenerse en cuenta al momento de configurar el sistema de empaque para evitar el agotamiento completo del nivel de O_2 como se observó en el ensayo para 20 °C. Por otra parte, existe una relación directa entre las velocidades de respiración y el tiempo de

preservación del producto pues un aumento rápido en la intensidad respiratoria puede indicar un proceso de maduración acelerado y por tanto un tiempo de vida útil más corto (Belay et al., 2017;Jalali et al., 2020).

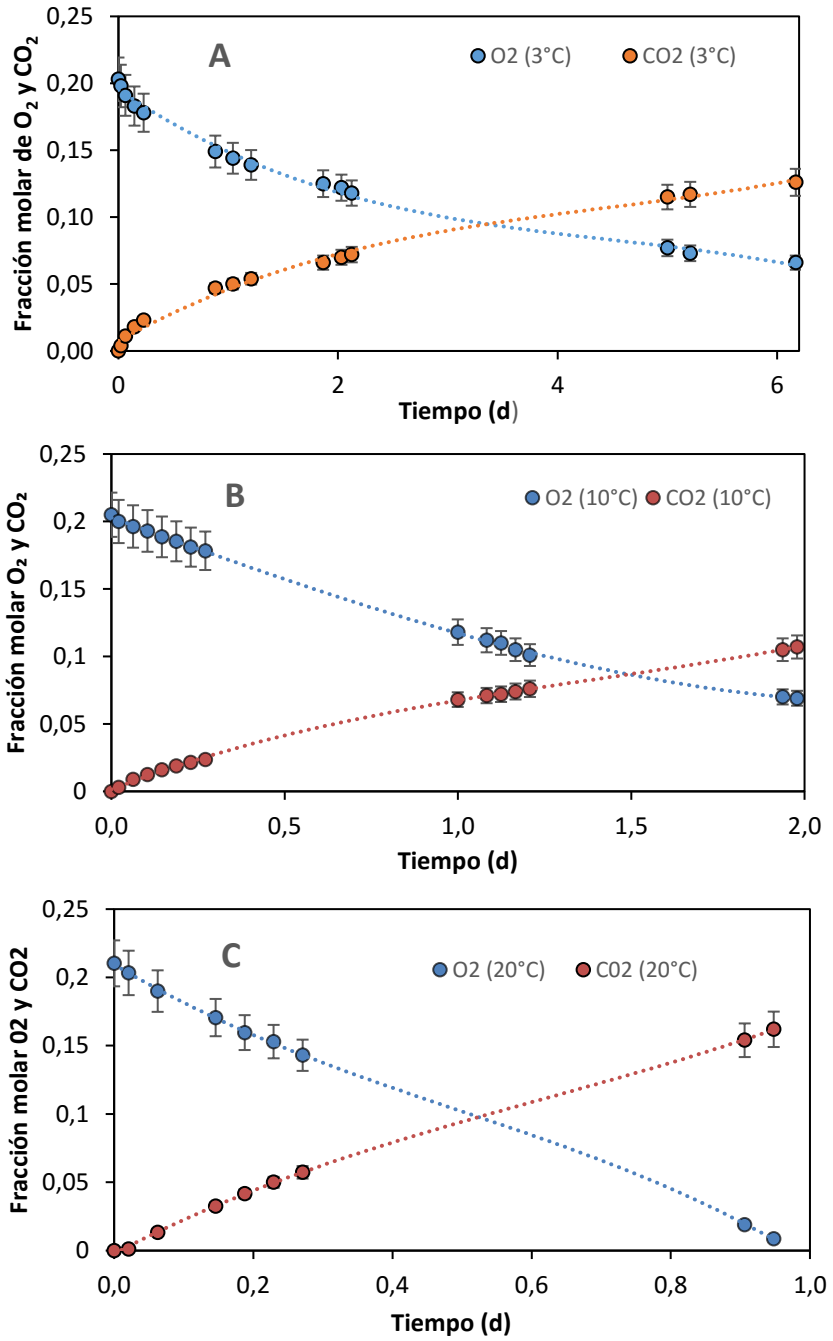
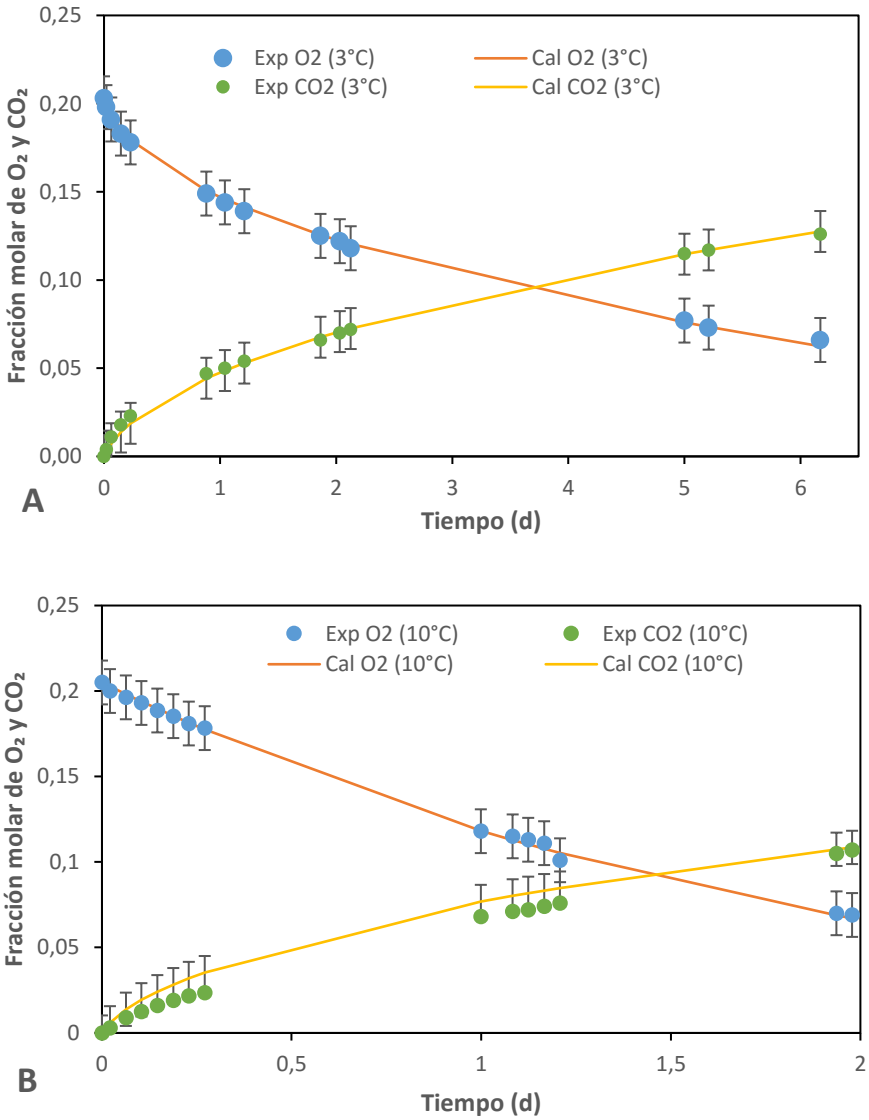


Figura 2.3 Concentraciones experimentales de consumo de oxígeno (O_2) y producción de dióxido de carbono (CO_2) para los frutos de fresa almacenados en los recipientes herméticos a 3 °C (A), 10 °C (B) y 20 °C (C). Se incluye la desviación estándar n = 3.

La respiración aeróbica en productos como la fresa se da por la degradación oxidativa de componentes como almidones, azucares y ácidos orgánicos resultando en la síntesis de moléculas más simples como agua y CO_2. El consumo de estos sustratos en el proceso de respiración se efectúa para generar energía en el interior de la célula vegetal para sus procesos metabólicos y trae como consecuencia la senescencia del producto y reducción de la firmeza y la masa del producto (Montoya et al., 2018). Así mismo, parte de la energía liberada en la respiración resulta en la generación de calor, el cual se libera desde el interior hacia la superficie de la fruta contribuyendo a la evaporación de agua de sus capas superficiales (Joshi et al., 2019).

2.3.2 Ajuste del modelo cinético de respiración



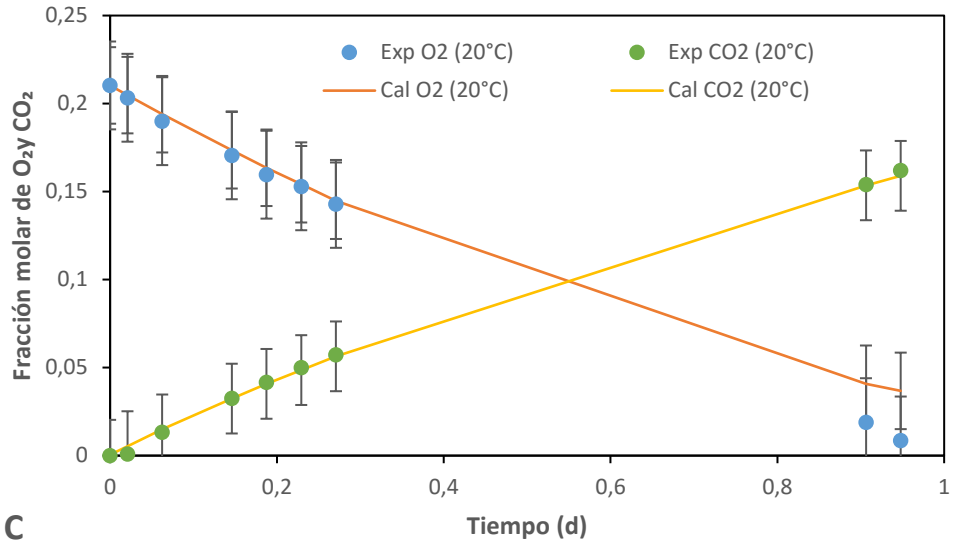


Figura 2.4 Fracciones molares de consumo de O_2 y producción de CO_2 experimentales (círculos) y calculadas (líneas) con la cinética de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2 para frutos de fresa a 3 °C (A), 10 °C (B) y 20 °C (C) en función del tiempo.

Tabla 2.1 Parámetros de respiración estimados para las cinéticas enzimáticas de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva de frutos de fresa a diferentes temperaturas.

Cinética de respiración	Parámetro (unidades)	Consumo (O_2)	Producción ($C0_2$)	Coeficiente de regresión (R^2)
Michaelis-Menten Anticompetitiva	***r_{max} ($cm^3\ kg^{-1}\ d^{-1}$)***			
	$r_{max,\ ref}$ a 23°C ($cm^3\ kg^{-1}\ d^{-1}$)	5623,1	2030,8	
	E_a (kJ mol^{-1})	58,10	51,69	
	Km			O_2 = 0,981
	$K_{m,\ ref}$ a 23°C	0,450	0,066	CO_2 = 0,988
	E_a (kJ mol^{-1})	8,21	36,87	
	Kmu			
	$K_{mu,\ ref}$ a 23°C	0,114	0,096	
	E_a (kJ mol^{-1})	78,45	58,96	

En la Figura 2.4 se presentan las gráficas de fracciones molares de O_2 y CO_2 experimentales y aquellas predichas por el modelo cinético de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2 (Ecuaciones 5 y 6) luego del ajuste de los parámetros de Arrhenius (Ecuación 7) por regresión no lineal minimizando los errores residuales. Se observa que a las diferentes temperaturas el modelo de MM con inhibición representa satisfactoriamente el comportamiento experimental tanto para el O_2 como el CO_2. En la Tabla 2.1 se muestran los parámetros para la cinética de MM con inhibición anticompetitiva por CO_2 para las tres temperaturas evaluadas además de los valores de R^2 para O_2 y CO_2.

La respiración de las frutas como la fresa generalmente se mide utilizando un sistema cerrado, donde al “encerrarse” los frutos en un corto periodo de tiempo en recipientes herméticos de volumen conocido como se realiza en el presente estudio se puede hacer el seguimiento de las concentraciones de O_2 y CO_2 y de este modo se pueden estimar las velocidades de respiración y el efecto de la temperatura y de los propios niveles de O_2 y CO_2 en estas velocidades (Garavito et al., 2021).

Los modelos de respiración son métodos eficientes para analizar la cinética de respiración, para predecir la velocidad de respiración en función de condiciones del gas y de la temperatura de almacenamiento. Según Fonseca et al., (2002) los datos experimentales obtenidos se pueden analizar de forma eficiente con un modelo matemático basado en la cinética de Michaelis-Menten que describe la velocidad de respiración en función de la composición del gas. Cuando se utiliza este modelo, la vía respiratoria de la fruta se simplifica en una única reacción enzimática (Mahajan & Goswami, 2001).

En un estudio realizado por Barrios et al., (2014) se utilizó un modelo sin efecto de inhibición de CO_2 con parámetros en función exponencial de la temperatura para describir la velocidad de respiración de la fresa obteniendo un ajuste satisfactorio (R^2= 0,91). En este caso, para los frutos de fresa evaluados se obtuvieron valores R^2 para oxigeno de = 0,981 y R^2 para dióxido de carbono de = 0,988 para la cinética MM con inhibición anticompetitiva a las diferentes temperaturas evaluadas (Tabla 2.1). Comparando el estudio de los autores con el presente estudio se logró obtener un mejor ajuste.

2.3.3 Efecto de los niveles de oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2) en la preservación de frutos de fresa a diferentes temperaturas de almacenamiento.

Una vez determinada la cinética de respiración para los frutos de fresa considerando el efecto de la temperatura se procedió a determinar el efecto de los niveles de O_2 y CO_2 en la preservación de los frutos a partir de las pruebas con AM. En todos los casos se observaron cambios en los niveles de O_2 y CO_2 para las bandejas de PLA selladas perforadas y sin perforar (control). Las fracciones molares promedio medidas en cada caso se muestran en la Tabla 2.2.

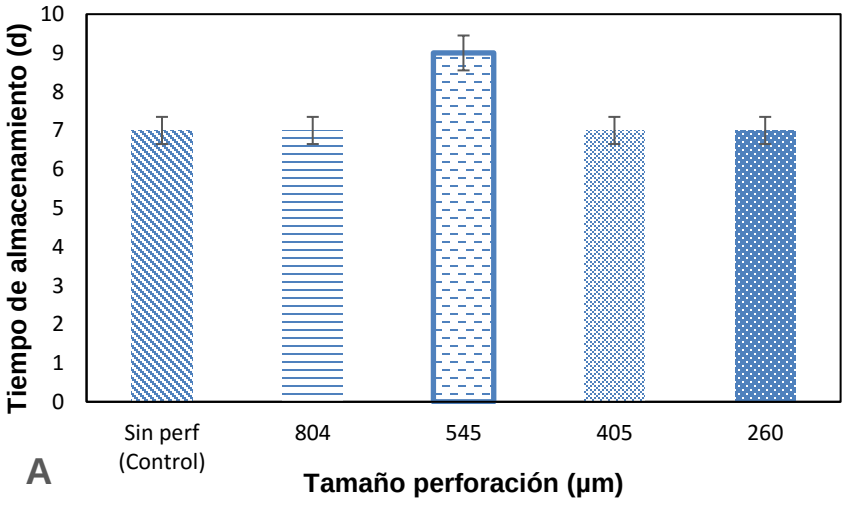
Tabla 2.2 Fracciones molares de O_2 y CO_2 medidas en el espacio de cabeza de bandejas termoselladas de PLA perforadas y con frutos de fresa a 4 y 20 ± 1 °C.

4 °C y 80 % HR			
Perforación (µm)	y_{O_2}	y_{CO_2}	**Vida útil (d)**
Sin perf	0,134	0,082	7
804	0,156	0,060	7
545	0,169	0,043	9
405	0,156	0,065	7
260	0,171	0,041	7
20 °C y 60 % HR			
Perforación (µm)	y_{O_2}	y_{CO_2}	**Vida útil (d)**
Sin perf	0,059	0,174	2
804	0,115	0,108	3
545	0,100	0,123	3
405	0,045	0,192	2
260	0,013	0,235	1

Al realizar el seguimiento visual para evaluar el deterioro y la aceptabilidad de los frutos de fresa se evidenciaron diferencias en el grado de contaminación fúngica en función de la temperatura y también del tamaño de la perforación realizada en la película de PLA, siendo más fuerte el efecto de la temperatura sobre la vida útil estimada para los frutos. A 4 °C se evidenció deterioro entre los 7 y los 9 días de almacenamiento (Tabla 2.2). En esta prueba, se obtuvo un tiempo de conservación de 9 días para los empaques con una perforación de 545 µm (y_{O2} = 0,169 y y_{CO2} = 0,043). Para las muestras almacenadas a 20 °C, se evidenciaron tiempos de conservación entre 1 y 3 días hasta el deterioro, obteniendo el mayor valor nuevamente para las bandejas con una perforación de 545 µm.

Los resultados obtenidos muestran que para niveles de y_{O2} = 0,169 y y_{CO2} = 0,043 a 4 °C y y_{O2} = 0,100 y y_{CO2} = 0,123 a 20 °C la preservación de los frutos de fresa se hace mayor. Estos resultados pueden estar relacionados con niveles adecuados de equilibrio en la AM que conducen a una reducción del metabolismo, del crecimiento de microorganismos y menor consumo de sustratos (González-Buesa & Salvador, 2022). En el caso del oxígeno, niveles cercanos o superiores al aire atmosférico puede provocar cambios indeseados de color, sabor y olor, a su vez estimular el crecimiento de bacterias aeróbicas y mohos. En cuanto al CO_2, niveles moderados contribuyen a retrasar el ciclo de Krebs y el proceso de respiración, pero niveles elevados pueden inducir a cambios indeseados en el sabor y desarrollo de glucolisis anaeróbica (Aday et al., 2011; Garavito et al., 2021).

El uso de atmosferas modificadas (AM) según (Aday et al., 2013; Caner et al., 2013) puede retardar los procesos de respiración y el consumo de sustratos lo que permite mantener la calidad de la fresa en términos de color, solidos solubles (°Brix), acidez titulable y niveles de ácido ascórbico cuando estas se almacenan en el aire. Especialmente a bajas temperaturas (4 °C) y con concentraciones reducidas de oxígeno y moderadas de CO_2 (5% O_2 y 15% CO_2 respectivamente). Sumado a lo anterior, combinar temperaturas de refrigeración con el uso de AM contribuye a tener tiempos más extendidos de preservación en comparación con el uso de cada técnica por separado (Garavito et al., 2022). Para la fresa se recomiendan temperaturas en el rango de 0 a 5 °C. Estos valores pueden disminuir de forma significativa la velocidad de los procesos metabólicos y prolongar el tiempo de vida útil por hasta 2 semanas (Brash et al., 1995).



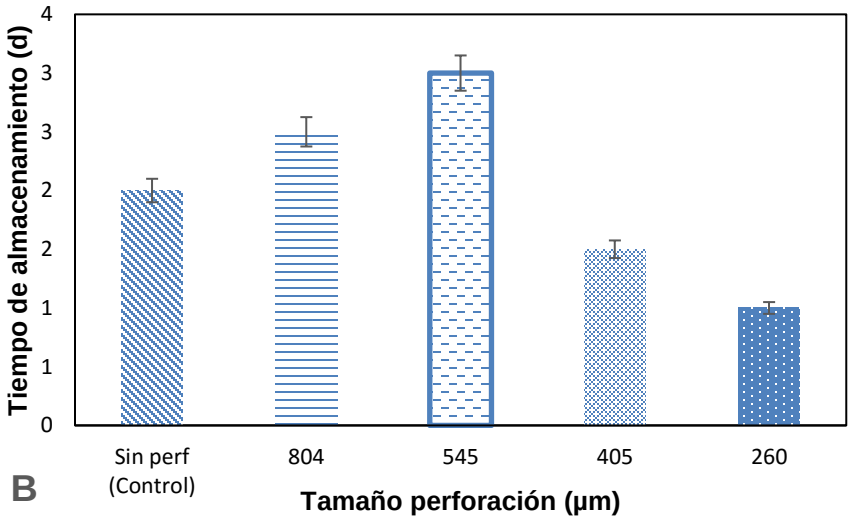


Figura 2.5 Tiempos de deterioro de frutos de fresa empacados en bandejas selladas de PLA con perforaciones de diferentes tamaños y almacenados a 4 °C (A) y a 20 °C (B). Desviación estándar incluida para n = 4.

Por otra parte, es difícil conseguir los niveles apropiados de O_2 y CO_2 debido solamente a la permeabilidad de estos gases a través del material de empaque como se observa para las bandejas sin perforación en la Tabla 2.2. En este caso el uso de micro perforaciones ayuda a incrementar el intercambio de gases permitiendo que el sistema de empaque pueda adaptarse a los requerimientos del producto (Kartal et al., 2012). En otros estudios (Chung et al., 2003). ya se han empleado empaques con perforaciones en el rango de 50-500 µm para obtener una AM apropiada para la preservación.

En el caso de fresa, Sanz et al., (2002) utilizaron películas con perforaciones para conservar la calidad de la fresa durante 10 días a 2 °C. Almenar et al., (2007) utilizaron películas microperforadas con una y tres perforaciones manteniendo la calidad química, física y sensorial de la fresa.

2.3.4 Conclusiones

La velocidad de respiración y de deterioro en frutos de fresa está estrechamente influenciada por la temperatura. Al incrementar la temperatura de almacenamiento la velocidad de consumo de oxígeno y de producción de CO_2 se incrementan rápidamente. Así mismo, la velocidad de deterioro también se ve directamente influenciada por la

temperatura de conservación obteniendo casi el triple de tiempo de vida útil a 4 °C respecto a temperatura ambiente.

El ajuste del modelo cinético de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2 combinado con el modelo de Arrhenius permitió representar adecuadamente el consumo de O_2 y producción de CO_2 de los frutos de fresa a las temperaturas evaluadas.

A partir de las pruebas con las bandejas perforadas se observó que niveles de O_2 de 16,9 % y de CO_2 de 4,3 % a 4 °C, y de O_2 de 10 % y de CO_2 de 12,3 % a 20 °C condujeron a la mayor preservación de los frutos de fresa.

Capítulo 3. Evaluación del efecto de tres componentes antimicrobianos y de un material adsorbente tipo arcilla sobre el deterioro y aceptabilidad de fresa determinando concentraciones apropiadas de actuación.

Resumen

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas de inclusión de un elemento activo empacado en sachets de algodón poroso y construido a base de bentonita en polvo saturada con un agente antimicrobiano. Se evaluó la inclusión de los sachets en el sistema de empaque teniendo en cuenta la configuración de atmosferas modificadas más favorables para la preservación de las fresas. Se probaron diferentes cantidades de bentonita y de tres agentes antimicrobianos (cinamaldehído, mentol y aceite esencial de clavo) puros y adsorbidos en la arcilla permitiendo su volatilización en el espacio de cabeza del empaque y evaluando el efecto sobre el deterioro y tiempo de conservación de los frutos. Al final se definieron los tratamientos más prometedores para hacer el estudio detallado de almacenamiento y vida útil de los frutos.

3.1 Materiales

3.1.1 Matriz adsorbente

Como material adsorbente de humedad y para la liberación controlada de las sustancias preservantes se empleó bentonita con tamaño de partícula de 0,01 - 0,03 mm (Compañía Colombiana de Cerámica, SA, Bogotá Colombia). Previamente a su uso, el material fue secado durante 24 horas a una temperatura de 70 °C en un horno para eliminar cualquier residuo de humedad retenida proveniente del ambiente.

3.1.2 Agentes preservantes antimicrobianos

Para los diferentes ensayos de utilizó cinamaldehído liquido (98 % v/v) de la empresa ADBAQUIM S.A.S. (Bogotá, Colombia), aceite esencial de clavo líquido y con un contenido aproximado de eugenol de 70 % (v/v) (doTerra International, USA), y por último, mentol solido en cristales obtenido de Químicos e Insumos Brymar S.A.S. (Bogotá, Colombia) el cual fue molido hasta un tamaño de partícula aproximado de 0,05-0.15 mm. El mentol después de molido fue dispuesto en un recipiente de vidrio hermético para evitar la adsorción de humedad y aglomeración hasta el momento del uso.

3.1.3 Materiales de empaque

Los diferentes ensayos de empaque con las sustancias preservantes fueron realizados con las bandejas selladas con la película de ácido poliláctico (PLA) que fueron descritas en la sección 2.1.2. En los empaques utilizados se hizo una perforación de 545 µm en la parte central de la película de PLA dado que con este tamaño de perforación se obtuvieron los niveles de O_2 y CO_2 más favorables para la preservación de los frutos tal y como se describe en los resultados del Capítulo 2 (Figura 2.3).

Como vehículo de empaque para los materiales preservantes (bentonita y agentes antimicrobianos) se elaboraron sachets rectangulares de 4,5 x 7 cm a partir de láminas de algodón poroso (CI Talsa, Itagüí, Colombia) de 0,958 mm de espesor. Los sachets utilizados fueron sellados al calor luego de cargarlos con los agentes preservantes en diferentes cantidades evaluadas como se explica a continuación.

3.2 Metodología

3.2.1 Determinación de una cantidad apropiada de bentonita en el sistema de empaque con atmosfera modificada

Con las bandejas selladas con la película de PLA y la perforación más adecuada para obtener un nivel de AM favorable, se evaluó inicialmente el efecto de diferentes cantidades de bentonita en la preservación de los frutos. Para esto, se empacaron 215 g de fresas en las bandejas y se prepararon diferentes tratamientos incluyendo un sachet en el empaque

con 1, 2 y 5 g de bentonita en polvo respectivamente. Los sachets fueron dispuestos en el fondo del empaque y sobre ellos se dispuso un soporte perforado para acomodar los frutos de tal forma que no entraran en contacto directo con los sachets. Además de los empaques con sachets, se prepararon bandejas selladas con la película perforada de PLA y otras abiertas sin película de PLA a modo de control. Los diferentes tratamientos de empaque se almacenaron nuevamente a 4 y a 20 °C evaluando visualmente la evidencia de deterioro en los frutos. Para cada tratamiento y control se prepararon 4 bandejas. Una vez identificado el deterioro o contaminación fúngica, se retiró el empaque afectado del ensayo midiendo entonces las concentraciones finales de O_2 y de CO_2 en la AM para determinar que tanto oxigeno se consumió y cuanto dióxido de carbono se produjo, la pérdida de peso de los frutos, evidencia de condensación de humedad y el tiempo de preservación en (días).

3.2.2 Efecto de los agentes antimicrobianos en estado puro a diferentes cantidades en la preservación de los frutos empacados.

Para la evaluación del efecto individual de los agentes antimicrobianos se realizó un montaje similar al descrito para los sachets de bentonita, con canastillas de PLA selladas con la película de PLA y la perforación óptima previamente definida. Inicialmente, se dispusieron las sustancias antimicrobianas a evaluar en el fondo del empaque en una caja de Petri de 5 cm (Figura 3.1). A continuación, se puso el soporte perforado y encima de este se introdujeron 215 g de fresa. Las cantidades evaluadas de cada sustancia preservante para la prueba fueron las siguientes: de cinamaldehído 50, 100 y 300 µl; de aceite esencial de clavo 70, 140 y 420 µl y de cristales de mentol molido 100 mg (Tabla 3.1). En el caso del aceite esencial de clavo las cantidades se ajustaron para que la cantidad efectiva de eugenol fuera la misma que aquella de cinamaldehído considerando una concentración de eugenol en el aceite de 70 %.

Las sustancias preservantes se colocaron sobre un filtro de papel vegetal dentro de la caja de Petri y de igual diámetro que esta para facilitar una evaporación controlada del antimicrobiano y evitar su cristalización, esto en el caso del cinamaldehído y el eugenol. Una vez armado el sistema de empaque con las concentraciones de los tres antimicrobianos, cada empaque con fruta fue sellado con la película de PLA perforada y luego se almacenaron a 4 °C y 80 % HR y a 20 °C y 60 % HR. Para determinar la efectividad de los tratamientos, se evaluó nuevamente la aceptabilidad y evidencia de deterioro en los

frutos a lo largo del tiempo descartando los empaques en donde se evidencie contaminación fúngica visible. Así mismo, antes de disponer los empaques descartad0s se midió la concentración de O_2 y CO_2 en la AM del empaque. Aparte de los empaques con los diferentes antimicrobianos se incluyeron frutos con el empaque de AM sin antimicrobiano como control del experimento.

Tabla 3.1 Tratamientos de sustancias preservantes evaluados en estado puro dentro de los sistemas de empaque.

	Agentes antimicrobianos		
Tratamiento	**Cinamaldehido [C] (µl g^{-1})**	**Aceite de clavo Eugenol [E] (µlg^{-1})**	**Mentol [M] (mg)**
Trat 0. Control	-	-	-
Trat 1.	50	-	-
Trat 2.	100	-	-
Trat 3.	300	-	-
Trat 4.	-	70 (50)*	-
Trat 5.	-	140 (100)	-
Trat 6.	-	420 (300)	-
Trat 7.	-	-	100

*Entre paréntesis la cantidad efectiva de eugenol en el aceite esencial de clavo

Figura 3.1 Secuencia de montaje de los empaques con fresa y la inclusión de las sustancias preservantes en estado puro.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó el efecto de cada agente preservante y la cantidad empleada en los frutos a cada temperatura de almacenamiento.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Inclusión de la bentonita en el sistema de empaque

En la Figura 3.2 se muestran los tiempos de preservación obtenidos para los frutos empacados con los sachets de bentonita a las dos temperaturas de almacenamiento

evaluadas. Para los frutos almacenados a 4 °C se alcanzaron 17 días hasta el deterioro de las muestras con 2 g de bentonita en los sachets, mientras que para los frutos a 20 °C máximo se obtuvieron 3 días de preservación con la misma cantidad de arcilla. Con cantidades mayores o menores de bentonita se obtuvieron tiempos de deterioro más bajos a las temperaturas evaluadas. Con cantidades bajas de bentonita la acumulación de condensación lleva a un deterioro más acelerado en el producto mientras que, por otra parte, cantidades muy grandes pueden contribuir al deterioro por una deshidratación excesiva. En todo caso, si bien el mayor tiempo de preservación se obtuvo para 2 g, la diferencia en los tiempos a 4 y 20 °C puede relacionarse al efecto más fuerte que tiene la temperatura en la maduración y deterioro de las fresas comparado con la acumulación de humedad dentro del empaque y la reducción en esta como consecuencia de la inclusión de la arcilla adsorbente.

Respecto a los empaques con AM y sin bentonita la mejora al incluir la arcilla no fue significativa a 20 °C pues se obtuvieron tiempos de preservación similares como se muestra en la Figura 3.2. Sin embargo, a 4 °C se observó un incremento importante en la preservación de los frutos de 9 hasta 17 días con la inclusión de los sachets de 2 g. A esta temperatura de refrigeración, la bentonita puede ejercer un control efectivo de la condensación contribuyendo a minimizar el deterioro microbiano durante más tiempo por su poder adsorbente efectivo en el sistema.

Los resultados obtenidos corresponden con otros estudios realizados para aguacate, uchuva y para lulo en donde la inclusión de materiales adsorbentes redujo la velocidad de deterioro e incrementó la vida útil del producto empacado (Escobar et al., 2023;Gaona-Forero et al., 2018).

Recientemente se ha evaluado la incorporación de diferentes materiales adsorbentes tales como gel de sílice, sales de poliacrilato, zeolitas o arcillas porosas en sobres o almohadillas para incrementar la preservación en empaques activos (Azevedo et al., 2011). Para que el elemento activo que se va a utilizar en el sistema de empaque tenga éxito al evitar la condensación en las paredes del empaque de frutas de alta velocidad de respiración como la fresa, se debe contar con una calidad optima de adsorción de humedad, que permita minimizar la condensación pero que al mismo tiempo evite la deshidratación del fruto (Gaona-Forero et al., 2018). Tal y como se observó con el sachet de 2 g de bentonita siendo esta arcilla adecuada para la retención de humedad.

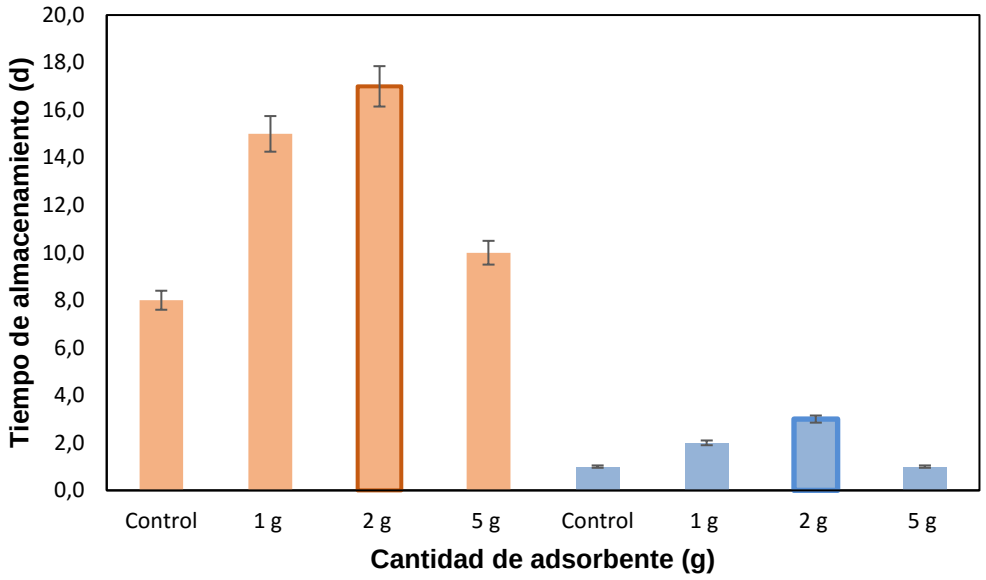
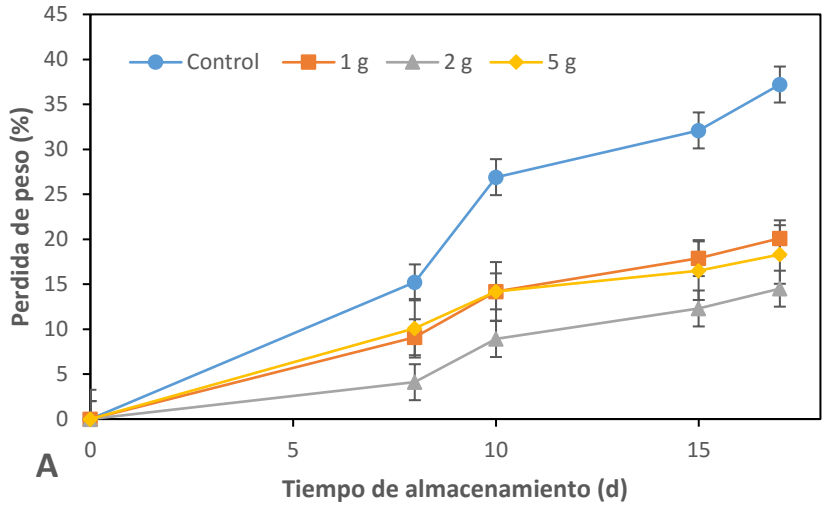


Figura 3.2 Tiempos de deterioro de frutos de fresa empacados en canastillas selladas con películas perforadas de PLA e incluyendo diferentes cantidades de bentonita en sachets porosos a 4 °C y 80 % HR (naranja) y 20 °C y 60 % (azul) HR respectivamente. Desviación estándar incluida para n = 4.



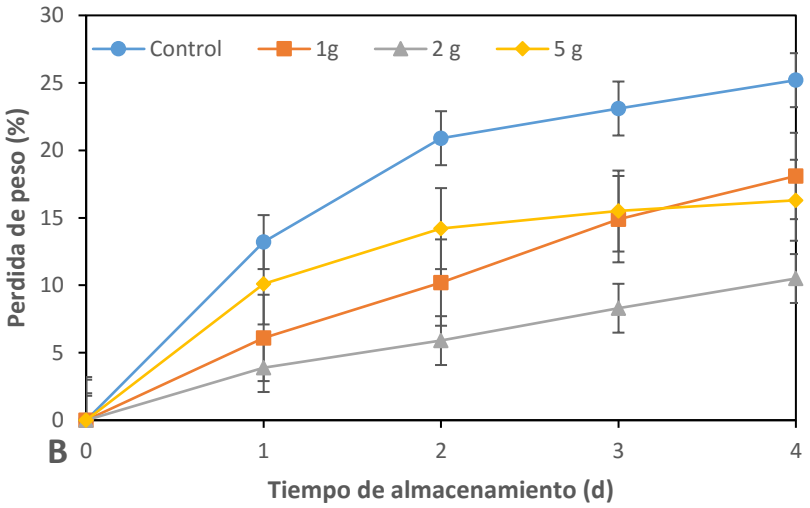


Figura 3.3 Pérdida de peso de los frutos empacados con 1 g, 2g y 5 g de bentonita en sachets a temperaturas de 4 °C y 80 % HR (A) y 20 °C y 60 % HR (B).

En cuanto a la pérdida de peso de los frutos que fueron almacenados a 4 y 20 °C como se muestra en la Figura 3.3 respectivamente, se tiene que para ambos casos el control, es decir, solo las frutas empacadas, obtuvo una pérdida de peso alta, en el caso de refrigeración para el día 17 un 37,2 % y en ambiente a los 4 días una pérdida de peso de 25,2 % a comparación con los otros tratamientos, teniendo en cuenta que los sachets empacados con 2 g de bentonita corresponden a los empaques que menos pérdida de peso obtuvieron de los frutos (4 °C con un 14,5 % y para 20 °C un 10,5 %). En comparación con otros estudios (Ortega et al., 2020) sobre el uso de adsorbentes de humedad en lulo, reportando que su control fue el que más peso perdió y mencionando que sus empaques de PLA el que menos perdió peso, destacando el uso de atmosferas modificadas reduciendo a 15 días las perdidas poscosecha en promedio de los ensayos.

3.3.2 Evaluación del efecto preservante de los agentes antimicrobianos en el sistema de empaque

A 20 °C la mayoría de los tratamientos condujeron a tiempos de preservación de 2-3 días. Similares a los obtenidos previamente para los empaques simples con AM y con la inclusión de los sachets de bentonita. Para el tratamiento con 50 µl de cinamaldehído se obtuvo una ligera mejora alcanzando 3,5 días de preservación en promedio. Por otra parte, para el tratamiento con 100 mg de mentol en polvo se obtuvieron 5,3 días de preservación en

promedio. En este caso, el mentol volatilizado en el espacio de cabeza del empaque condujo a una mayor inhibición en el crecimiento y actividad de los microorganismos causantes de deterioro en los frutos de fresa. Estos resultados son similares a los obtenidos

El uso de compuestos antimicrobianos naturales se ha convertido en alternativa útil para la conservación de frutas frescas por su efectividad en el control de microorganismos causantes de deterioro como *Botritis, Alternaria y Fusarium* (Janjarasskul & Suppakul, 2018). Los componentes, evaluados como el cinamaldehído, mentol y eugenol pueden volatilizarse relativamente fácil en el espacio de cabeza del empaque e inhibir el crecimiento de los hongos mencionados antes sobre la superficie del producto empacado (Cortés et al., 2023). Al ser volatilizables, las propiedades sensoriales de la fresa se alcanzan a ver afectadas en algunos casos dependiendo la temperatura de almacenamiento al entrar rápidamente en contacto con la misma, teniendo en cuenta que un fruto como la fresa no cuenta con una barrera protectora que impida la impregnación de este tipo de agente antimicrobiano.

Según (Rusková et al., 2023) evaluaron el uso de almohadillas incorporando aceites esenciales de orégano y limoncillo en fresas empacadas a 4 °C y 85 % HR, donde obtuvieron resultados aceptables en la inhibición de mohos durante 21 días con aceite esencial de limoncillo. Comparado con el presente estudio al evaluar el efecto puro de mentol almacenado a 4,1 °C y 80,1 % HR durante 25 días hasta que se evidencio presencia de microorganismos (Figura 3.4). Por otra parte en el ensayo realizado a 20 °C y 60,4 % HR se logró obtener 5,5 días de vida útil utilizando mentol puro (0,1 g) (Figura 3.5). Para otros estudios se ha reportado buenos resultados en la conservación de algunas bayas utilizando aceite esencial de clavo, canela y tomillo (Cortés et al., 2022)

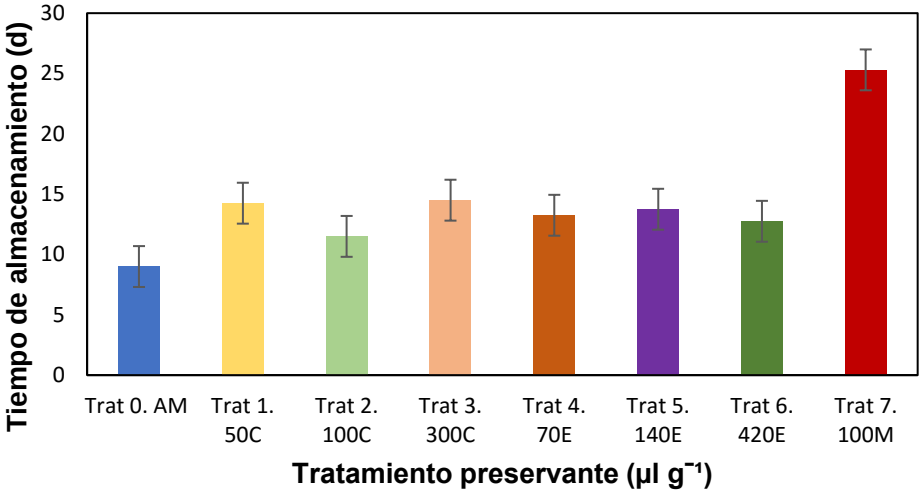


Figura 3.4 Tiempos de deterioro de frutos de fresa empacados en canastillas selladas con películas perforadas de PLA e incluyendo diferentes tratamientos de cinamaldehído (C) aceite esencial de clavo (E) y mentol (M) en cajas de Petri a 4 °C y 80 % HR de acuerdo con la Tabla 3.1

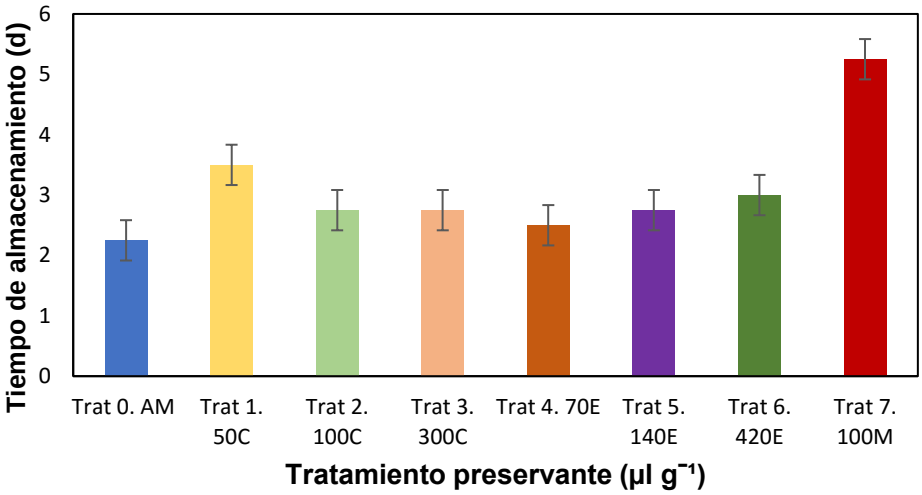


Figura 3.5 Tiempos de deterioro de frutos de fresa empacados en canastillas selladas con películas perforadas de PLA e incluyendo diferentes tratamientos de cinamaldehído (C), aceite esencial de clavo (E) y mentol (M) en cajas de Petri a 20 °C y 60 % HR de acuerdo con la Tabla 3.1.

Se observó que para algunos de los tratamientos, sobre todo a las concentraciones más altas de cinamaldehído y mentol, las propiedades sensoriales de la fresa se alcanzaron a

ver afectadas sobre todo su sabor al haber impregnación el antimicrobiano en el producto ya que un fruto como la fresa no cuenta con una barrera protectora que impida la impregnación de este tipo de agente antimicrobiano.

Respecto a la pérdida de peso (Lamúa Soldevilla, 2000) en su estudio, se pudo observar que, dentro de los principales cambios que se producen en las frutas frescas de pitahaya en función del tiempo, durante los seis días de almacenamiento después de cosecha, almacenadas en atmosferas modificadas y con la incorporación de agentes preservantes, es significativa la pérdida de peso, asociándose directamente con el déficit de presión de vapor entre la superficie y la atmosfera en la que se encuentra almacenado el fruto, debido a que se establece un gradiente de vapor de agua que conlleva a la pérdida de peso (Imsabai et al., 2006) .

Por otra parte, evaluando la condensación de agua (Figura 3.6) que se visualizó en la película de PLA pegada en la superficie del empaque, luego de ser almacenadas en las cámaras climáticas a diferentes temperaturas y que al aclimatarse se lograban desaparecer, se da en consecuencia de la saturación del espacio de cabeza del empaque debido a las tasas de transpiración altas en comparación con la velocidad de transmisión de vapor de agua fuera del empaque (Gómez et al., 2020), es decir, por los cambios bruscos de la temperatura a la cual se empieza a almacenar los frutos.

Figura 3.6 Condensación de agua en la superficie interna de los empaques de PLA con frutos de fresa.

3.3.3 Conclusiones

La inclusión de bentonita en el sistema de empaque permitió controlar la generación de condensación desde los frutos lo que condujo a un importante incremento en el tiempo de preservación a 4 °C. A 20 °C la mejora no fue relevante respecto al sistema base de empaque con atmosferas modificadas. De las cantidades de bentonita evaluadas, la cantidad optima en el sachet fue de 2 g, que logra regular eficientemente la humedad durante el almacenamiento de fresas a diferentes temperaturas de almacenamiento.

En cuanto a la inclusión de las sustancias preservantes, la reducción en el deterioro de los frutos fue más notoria a 4 °C comparado a 20 °C. A esta última temperatura solo se obtuvo una mejora significativa del tiempo de preservación con la inclusión de 100 mg de mentol. Sin embargo, se obtuvieron efectos adversos en el sabor de los frutos para las cantidades de agentes preservantes más altas que fueron evaluadas.

Capítulo 4. Inclusión de un elemento activo combinando bentonita y agentes preservantes en el sistema de empaque

Resumen

En este capítulo se describen las pruebas realizadas para determinar el efecto de la combinación de bentonita y agentes preservantes previamente evaluados en el sistema de empaque con AM para la preservación de los frutos de fresa a 4 y a 20 °C. Para esto se preparó una mezcla de la bentonita con los agentes preservantes saturados en esta, empacándola en sachets e introduciéndola en las bandejas con las películas perforadas de PLA teniendo en cuenta el nivel de AM más adecuado para la preservación. En los ensayos se evaluaron los cambios en diferentes propiedades de calidad como aspectos sensoriales de aroma y sabor, parámetros fisicoquímicos como actividad de agua, solidos solubles totales, acidez total titulable y cambios de color de los frutos y se determinó el tratamiento de empaque activo con la mayor capacidad antifúngica y en el cual las características del producto se mantuvieron por mayor tiempo.

4.1 Metodología

4.1.1 Preparación de los tratamientos para el ensayo de empaque activo combinado

De acuerdo con los resultados previamente obtenidos para las pruebas se utilizaron empaques con las películas de PLA descritas en el Capítulo 2 en las cuales se hizo una perforación de 545 µm (0,54 mm) en la parte central para obtener la AM apropiada. Así mismo, de acuerdo con los resultados obtenidos respecto a la inclusión de bentonita en polvo (descritos en el Capítulo 3), para la preparación de los sachets con la combinación de sustancias preservantes se utilizaron 2 g de arcilla previamente secada.

Se prepararon diferentes mezclas de adsorbentes y agentes antimicrobianos de acuerdo con las cantidades con mejor efecto preservante elegidas en los ensayos previos (Capítulo

3). Para esta prueba se evaluó el adsorbente solo, adsorbente + mejor concentración de cinamaldehído, adsorbente + mejor concentración de aceite de clavo combinadas y finalmente, adsorbente + tres concentraciones diferentes de mentol como se indica en la Tabla 4.1.

Los antimicrobianos líquidos se mezclaron con la bentonita hasta formar una masa homogénea seca. Luego del mezclado, la masa resultante fue molida para formar un granulo fino (solo en los casos necesarios) el cual se introdujo en los sachets de algodón de acuerdo con las cantidades óptimas de bentonita y antimicrobianos previamente determinadas. Los sachets se sellaron entonces con calor y fueron almacenados en un recipiente hermético hasta el momento de su uso. Para el experimento, los sachets fueron pesados en el día inicial y el día final determinando la diferencia de pesos con el fin de estimar la posible humedad adsorbida.

Tabla 4.1 Tratamientos empleados para la prueba de configuración del sistema de empaque activo para frutos de fresa.

Microperforación	**Material adsorbente (Bentonita)**
1 x 545 µm	2g
TRATAMIENTOS EVALUADOS	
Mentol (mg)	25 50 100
Combinación C+E (µl)	100 + 70
Eugenol (µl)	70
Cinamaldehido (µl)	100

4.1.2 Prueba de empaque y almacenamiento con la inclusión de bentonita combinada con los agentes antimicrobianos

Una vez armados los sachets con las diferentes cantidades de adsorbente y agentes antimicrobianos estos se colocaron en el fondo de las canastillas de PLA de igual forma a lo que se describió en el Capítulo 3. Para separar el sachet de los frutos se colocaron soportes plásticos perforados de PLA encima de los sachets. En cada canastilla se colocaron 215 g de fresa fresca igual que en los ensayos previos.

Una vez dispuestos los frutos, los empaques fueron sellados con la película de PLA en la cual se hizo la microperforación de 545 µm en el centro. La disposición de los empaques se muestra en la Figura 4.1. Posterior a esto, los empaques fueron almacenados a 4 °C y 20 °C haciendo el seguimiento del grado de deterioro causado por microorganismos de forma similar a los ensayos previos. Así mismo, también se evaluó el cambio en el color, la firmeza, actividad de agua, sólidos solubles totales (SST), acidez titulable y aceptabilidad sensorial tal y como se describe en la siguiente sección. Estas mediciones se realizaron en los días 0, 3, 4, 5 y 6 para los frutos a 20 °C y 0,5, 10, 15 y 20 para los frutos a 4 °C. Todos estos ensayos se hicieron por triplicado en unidades experimentales independientes las cuales fueron descartadas luego de las mediciones.

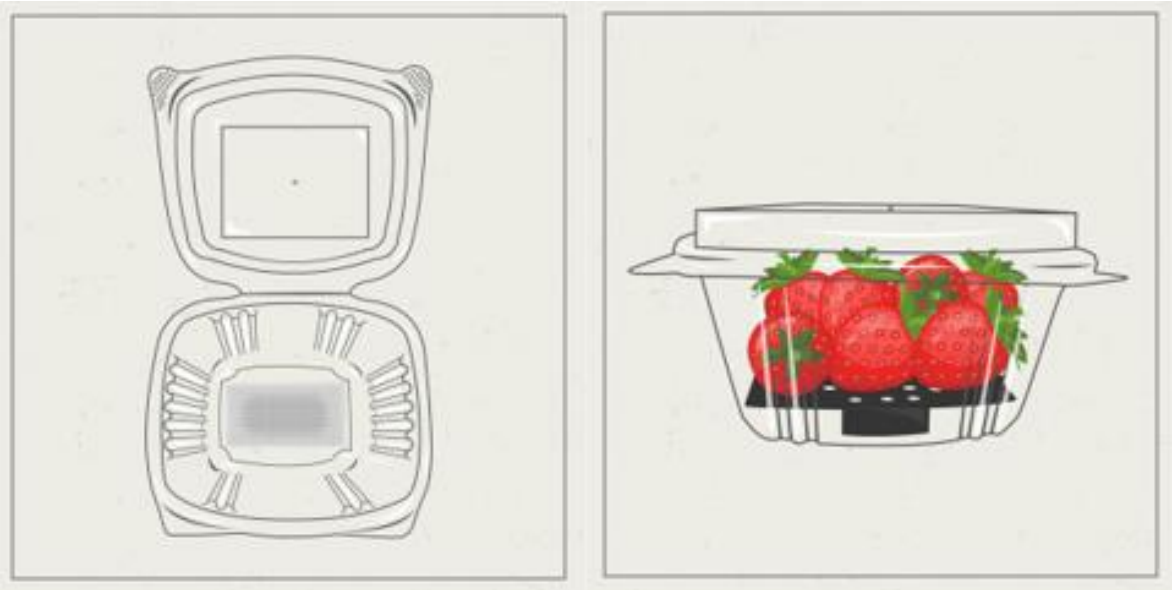


Figura 4.1 Disposición del sistema de empaque activo para los frutos de fresa con los sachets de bentonita mezclada con los diferentes agentes antifúngicos, aceite esencial de clavo/eugenol y mentol.

Al igual que en las pruebas anteriores, cuando se detectó visualmente la evidencia de al menos un fruto con contaminación fúngica o deterioro se hizo el descarte del empaque respectivo. A partir de esta evaluación se estableció el tiempo de conservación de los frutos para cada tratamiento. Antes de descartar y abrir el empaque para las medidas fisicoquímicas se realizó la determinación de O_2 y CO_2 en el espacio de cabeza con el analizador de gases descrito previamente para las pruebas de respiración y configuración de MAP (Capítulo 2).

4.1.3 Evaluación de la calidad y aceptabilidad sensorial de los frutos en el empaque activo con los agentes preservantes

En los diferentes días de medición, el color de los frutos se midió sobre la superficie en el centro del área ecuatorial utilizando un colorímetro, CR-410 (Konica, Minolta) reportando las coordenadas L*, a* y b* del espacio de color CIELAB (Minolta Camera Co., Osaka, Japón) considerando un iluminante estándar “Daylight 65” y un observador de 10° (Garavito et al., 2022). Cada medición se llevó a cabo en tres repeticiones para registrar su valor medio y la desviación estándar correspondiente.

El contenido de solidos solubles totales (SST) se determinó en porcentaje (p/p) midiendo el índice de refracción del jugo clarificado obtenido de la pulpa de las muestras utilizando un refractómetro digital Hanna® modelo HI96801 (Hanna Instruments, Woonsocket, Rhode Island, Estados Unidos). La acidez titulable se determinó utilizando un titulador automático Metrohm 916 Ti-Touch (Metrohm AG, Herisau, Suiza). Para esto, se tomaron 25 ml de agua destilada y 5 ml de zumo de la fruta y se tituló la mezcla con una solución estandarizada 0.1 N NaOH hasta alcanzar un pH de equilibrio de 8,1. Todo el análisis se realizó por triplicado para determinar el valor promedio y la desviación estándar de los datos obtenidos.

La firmeza de los frutos se determinó a través de una prueba de penetración en el área ecuatorial de la fruta utilizando un texturómetro LLOYD® LS1 (Ametek, Inc., Berwyn, PA, USA) equipado con una sonda metálica de 2 mm de diámetro de punta plana. Para el ensayo de penetración se fijó una velocidad de prueba de 2 mm s^{-1}. La firmeza fue medida como la fuerza máxima requerida para penetrar el fruto a una profundidad de 5 mm.

La actividad de agua (a_w) se determinó con un medidor de actividad de agua Higrolab C1 (Rotronic, AG, Bassersdorf, Switzerland) por el método de punto de rocío tomando muestras de fruta en una capsula de 10 cm^3.

La aceptabilidad sensorial de los frutos empacados se determinó evaluando el aroma y el sabor de las muestras empacadas determinando las diferencias significativas a lo largo de los días de almacenamiento con respecto a los frutos en fresco. Para la evaluación se realizó una puntuación entre 0 a 3 fuertemente alterado realizada por 3 personas. En este caso se evaluaron también los cambios evidenciados por la presencia de los agentes preservantes.

4.1.4 Análisis microbiológico

Al momento de descartar los frutos de fresa con evidencia de deterioro durante el ensayo de empaque y almacenamiento, se tomaron muestras de los microorganismos evidenciados en la superficie de los frutos, tomando laminas delgadas de la corteza de algún fruto afectado por hongos por cada uno de los tratamientos rotulados como: 7.100C (100 µl cinamaldehído +2 g de bentonita); 1.70E (70 µl eugenol + 2 g de bentonita); 12.100 M (100 mg mentol + 2 g de bentonita); 8.100C+70E (100 µl cinamaldehído + 70 µl eugenol + 2 g de bentonita); 5 AM (solo atmosfera modificada).

Las muestras para incubar fueron preparadas utilizando 1g de muestra en 99 mL de agua peptonada previamente preparada al 0.1%. A partir de esto se prepararon cajas Petri con los cultivos en medio PDA, y siguiendo la metodología se siembra por soluciones seriadas (1/10) se realizó la siembra del hongo en un medio estéril incubado a 28 °C por 5 días, y luego un segundo aislamiento en las mismas condiciones para obtener una muestra aislada del hongo presente en los frutos, y para finalizar se realizó el respectivo recuento para cada uno de los tratamientos evaluados.

4.1.5 Análisis estadístico

Para evaluar el efecto de los diferentes tratamientos de empaque se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 95% ($\alpha = 0,05$) para los valores medios (± desviación estándar) de las propiedades medidas. Las diferencias significativas entre las medias de cada propiedad medida para los diferentes tratamientos a lo largo del tiempo se determinaron a partir de la prueba HSD de Tukey utilizando el Software Statgraphics Centurion XVIII (Statgraphics Technologies Inc., The Plains, VA, Estados Unidos).

4.2 Resultados y discusión

4.2.1 Tiempo de preservación de los frutos bajo los diferentes tratamientos de empaque activo

Para los frutos empacados en refrigeración a 4 °C y 80 % de HR con 50 mg de mentol + 2 g de bentonita en los sachets se alcanzaron 25 días de preservación, seguido de 24 días de vida útil con 25 mg de mentol y 23 días con 100 µl de cinamaldehído. Por otra parte, a

condiciones ambiente de 20 °C y 60 % de HR se obtuvieron los más altos días de vida útil, para el tratamiento de 100 mg de mentol 5,3 días, seguido del tratamiento con 100 µl de cinamaldehído + 70 µl de eugenol 5,2 días y el tratamiento con solo 100 µl de cinamaldehído 5,2 días.

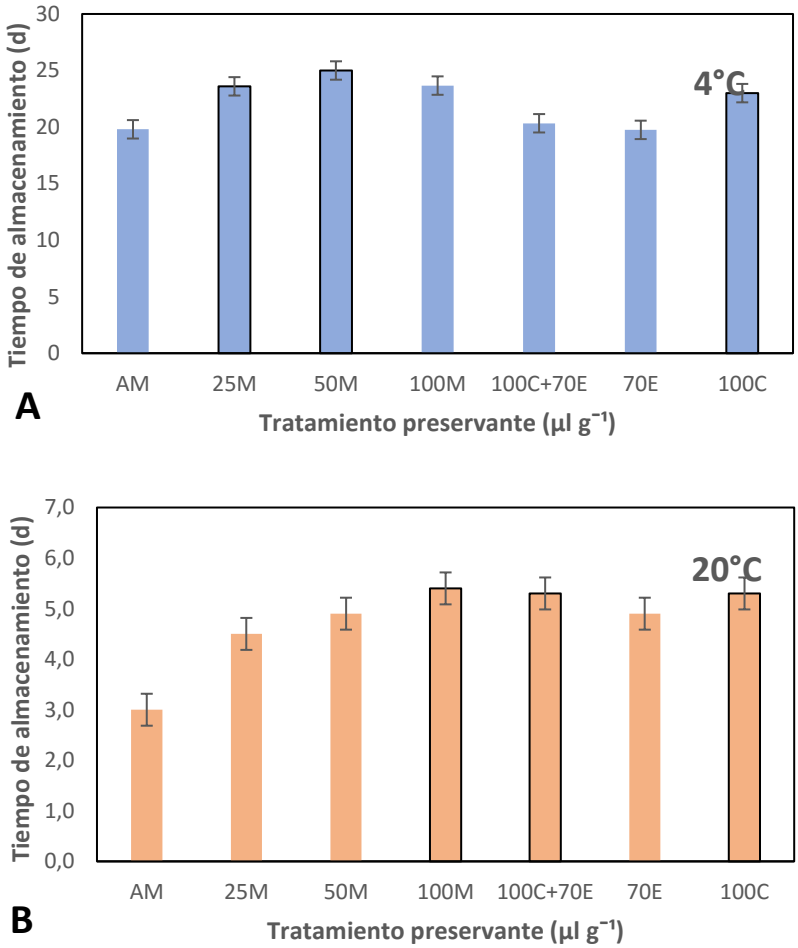


Figura 4.2 Tiempo de preservación de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol en sachets con bentonita a 4 °C y 80 % de HR (A) y 20 °C y 60 % HR (B) respectivamente.

La similitud en los días de vida útil del ensayo realizado a temperatura ambiente puede estar relacionado al mayor efecto que a estas condiciones tiene la temperatura sobre los procesos de maduración y de senescencia en los frutos lo que resulta en que no se observen mayores diferencias con la inclusión de los agentes antimicrobianos. En todo caso se tiene un incremento en el tiempo de preservación de más de 3 días respecto a los frutos almacenados sin un empaque con AM y de 2 días para el empaque simple con AM (Figura 4.2). De acuerdo con los resultados observados, la velocidad de los procesos metabólicos

de los frutos se mantiene alta lo que lleva a un mayor consumo de sustratos y aceleración del deterioro (Garavito et al., 2021).

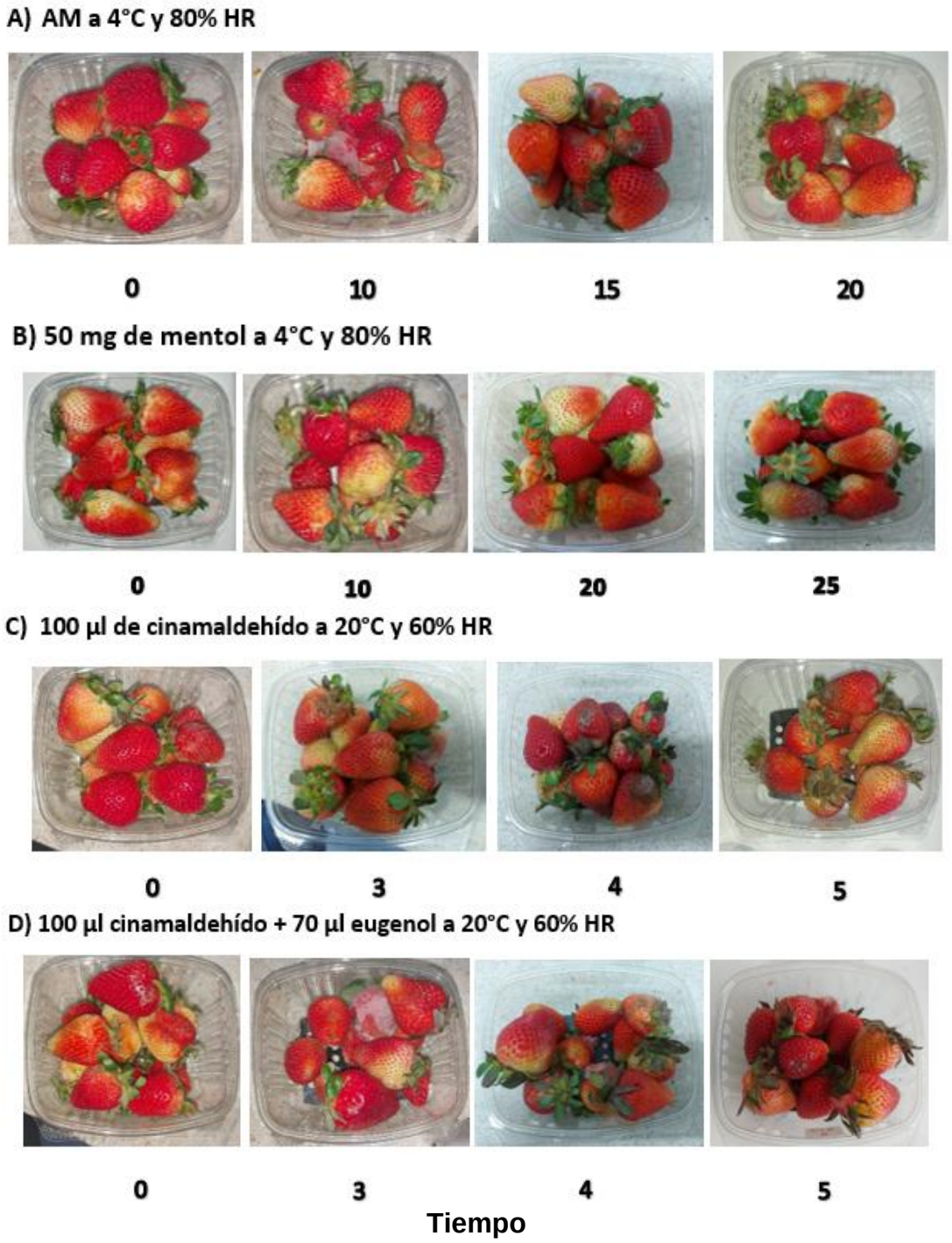


Figura 4.3 Evolución visual de los frutos de fresa bajo tratamientos seleccionados de empaque activo. A) solo atmósferas modificadas a 4 °C, B) inclusion de sachets con 50 mg

de mentol + 2 g de bentonita 4 °C, C) sachets con 100 µl de cinamaldehído + 2 g de bentonita a 20 °C.

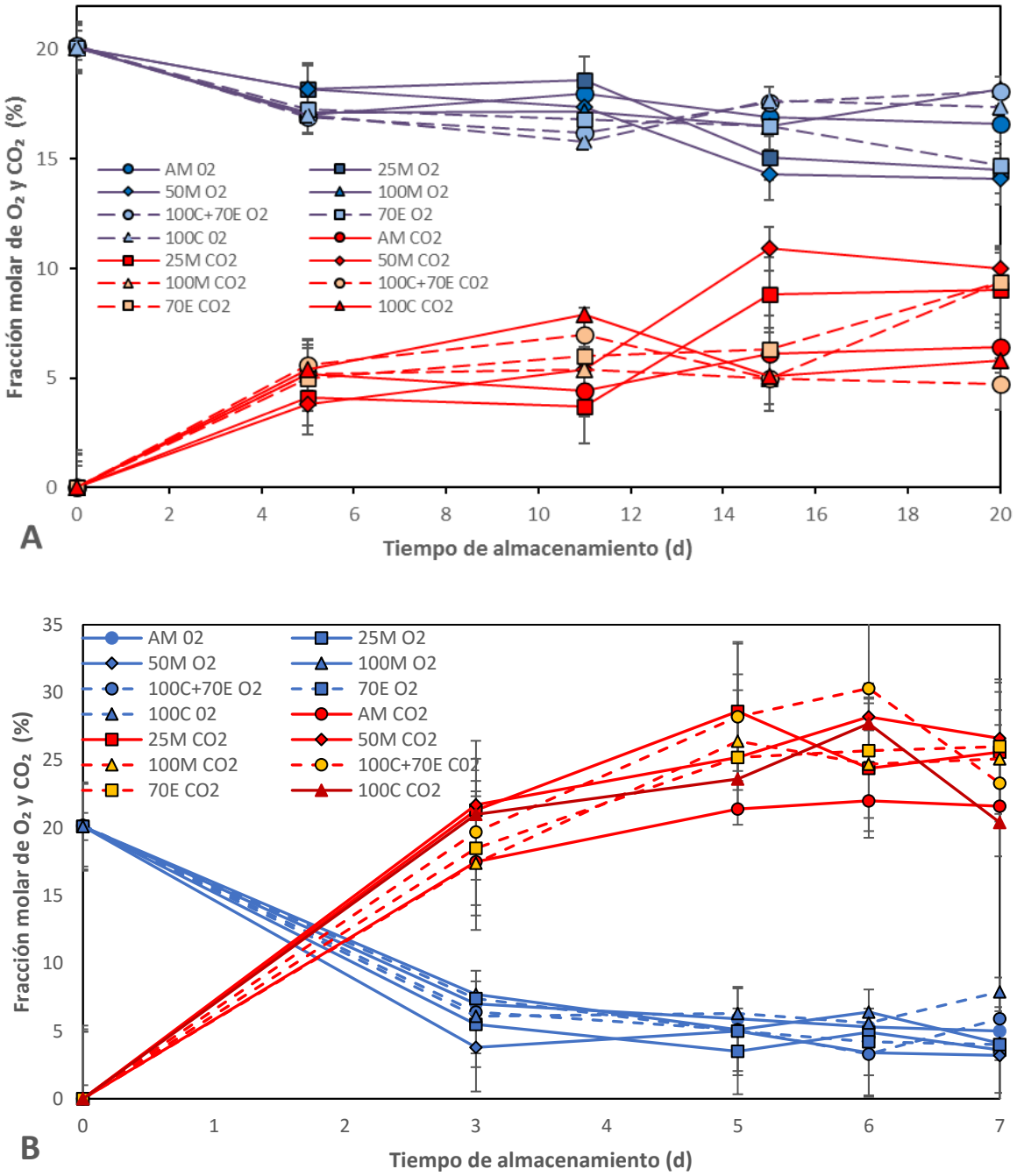


Figura 4.4 Fracciones molares de O_2 y CO_2 para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo sachets de bentonita y cinamaldehído,

aceite de clavo (eugenol) o mentol a 4 °C y 80 % de HR (A) y 20 °C y 60 % de HR (B). Desviación estándar incluida para n = 3.

En la Figura 4.3 se evidencia la evolución visual de los frutos de fresa para algunos tratamientos seleccionados. En todos los casos se observa que el deterioro inicia desde la corona del fruto y se va extendiendo hasta el cuerpo a medida que se da el crecimiento de hongos. Pero en el caso de los empaques tratados con 50 mg de mentol, se puede evidenciar que al transcurrir el tiempo sus coronas permanecen verdes, reflejando una tonalidad fresca. En el caso de los tratamientos evaluados a 20 °C se puede visualizar que al pasar los días su deterioro aumenta, así como su color natural a fresa, oscureciéndose, llegando a su total deterioro y posterior senescencia. Los frutos almacenados a temperatura de refrigeración independientemente de su tratamiento conservan en la mayoría de sus frutos sanos, su color rojo brillante y frescura aparente. En la figura descrita se realizó una selección de los frutos que menor crecimiento fúngico presentaron, donde solo se evidencia daño microbiológico en 1/12 frutos máximo 3/12 frutos. Llegando a la conclusión de que el mejor comportamiento de preservación de acuerdo a la evidencia fotográfica lo presento el mentol (50 mg) con 2g de bentonita en los sachets a una temperatura de almacenamiento de 4 °C y 80 % de HR en los empaques sellados con películas de PLA.

Con respecto a los niveles de O_2 y CO_2 en el espacio de cabeza del empaque, se observó una reducción del O_2 y un incremento del CO_2 hasta alcanzar valores estables de 16-17 % de O_2 y 7-8 % de CO_2 para el día 20 a 4 °C y 80 % HR; para 20 °C y 60 % de HR se alcanzaron valores estables de 5-10 % para O_2 y 22-28 % para CO_2 para el día 7 como se muestra en la Figura 4.4. Todos los tratamientos, presentaron un comportamiento similar en cuanto al consumo de O_2 y producción de CO_2 al pasar los días de almacenamiento. Se puede observar el incremento significativo de la concentración de CO_2 para los frutos a 20 °C lo cual está relacionado a un incremento significativo de la velocidad de respiración y a la degradación de sustratos asociados a la senescencia y pérdida de vida útil del producto.

Dada la sensibilidad y facilidad del deterioro en los frutos de fresa, una sola tecnología de preservación no resulta ser suficiente para su manejo y comercialización. Los resultados obtenidos indican que para lograr extender la vida útil de forma significativa en este producto se requiere y se recomienda el almacenamiento en temperaturas de refrigeración con un nivel de gases optimo en el espacio de cabeza del empaque, además de mantener el control

de la humedad (y minimizar la condensación) en el interior con el uso de adsorbentes como la bentonita y el control de la actividad microbiana con sustancias preservantes como el mentol y el cinamaldehído.

4.2.2 Cambios en las propiedades fisicoquímicas de los frutos empacados

En cuanto al color de los frutos de fresa, como se observa en la Tabla 4.2, para las pruebas a 4°C hubo una ligera disminución de luminosidad en comparación con el dato obtenido en el día cero, en cuanto a la coordenada a* de color rojo a verde, se evidenció la subida de los tonos rojos, de más claro a más oscuro, dado por efectos de maduración y oscurecimiento de los frutos. Para la coordenada b* se presentaron ligeros cambios, presentando similitud en los datos obtenidos, con leves variaciones.

Tabla 4.2 Evolución de las coordenadas de color CIELAB de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR.

Propiedad	Tratamiento	Día 0	Día 5	Día 11	Día 15	Día 20
Luminosidad (L*)	AM	36,68 ± 4,27 a	29,25 ± 3,41 Ab	31,34 ± 1,55 Ab	28,94 ± 0,80 Aa	30,70 ± 1,60 Aa
	25M		29,34 ± 2,17 Ab	30,87 ± 2,25 Ab	32,29 ± 2,75 Aa	29,82 ± 1,70 Aa
	50M		29,07 ± 2,80 Ab	32,68 ± 0,71 Ab	32,76 ± 1,07 Aa	32,45 ± 2,05 Aa
	100M		26,83 ± 2,45 Ab	32,23 ± 5,62 Ab	29,86 ± 3,45 Aa	31,45 ± 0,64 Aa
	100C+70E		26,63 ± 0,52 Ab	28,28 ± 1,14 Ab	30,85 ± 1,06 Aa	32,43 ± 0,86 Aa
	70E		27,07 ± 0,23 Ab	30,23 ± 1,23 Ab	31,65 ± 0,46 Aa	33,55 ± 1,64 Aa
	100C		27,51 ± 0,82 Ab	30,94 ± 1,95 Ab	28,28 ± 1,11 Aa	32,61 ± 0,62 Aa
Coordenada (a*)	AM	33,26 ± 3,17 b	31,21 ± 2,45 Ab	34,76 ± 3,27 Ab	35,93 ± 0,84 Aa	33,70 ± 1,27 Aa
	25M		35,16 ± 1,13 Ab	32,99 ± 1,78 Ab	36,89 ± 1,49 Aa	37,52 ± 1,55 Aa
	50M		32,00 ± 3,04 Ab	33,99 ± 1,52 Ab	37,22 ± 2,26 Aa	37,79 ± 1,90 Aa
	100M		32,42 ± 2,29 Ab	30,57 ± 0,57 Ab	33,95 ± 0,42 Aa	36,36 ± 0,90 Aa
	100C+70E		33,70 ± 1,28 Ab	34,67 ± 1,71 Ab	33,82 ± 1,95 Aa	34,94 ± 1,30 Aa
	70E		32,64 ± 2,09 Ab	34,80 ± 0,71 Ab	37,25 ± 1,43 Aa	38,64 ± 1,67 Aa
	100C		32,69 ± 2,09 Ab	35,42 ± 2,01 Ab	37,50 ± 0,95 Aa	35,19 ± 1,85 Aa
Coordenada (b*)	AM	21,28 ± 16,49 b	22,98 ± 3,17 ABa	23,89 ± 2,29 ABa	23,07 ± 1,40 Aa	24,85 ± 1,94 ABa
	25M		23,52 ± 1,33 ABa	18,22 ± 1,88 ABa	26,23 ± 2,83 Aa	23,05 ± 0,39 ABa
	50M		21,32 ± 2,93 ABa	19,93 ± 1,43 ABa	27,11 ± 0,85 Aa	25,48 ± 2,68 ABa
	100M		21,78 ± 2,08 ABa	23,22 ± 3,69 ABa	24,27 ± 3,85 Aa	22,41 ± 1,58 ABa
	100C+70E		22,80 ± 0,97 ABa	20,79 ± 1,56 ABa	24,24 ± 2,74 Aa	19,41 ± 0,52 ABa
	70E		23,82 ± 0,49 ABa	24,85 ± 2,95 ABa	25,19 ± 0,97 Aa	23,51 ± 1,56 ABa
	100C		22,94 ± 0,44 ABa	25,18 ± 2,03 ABa	22,78 ± 0,75 Aa	23,87 ± 3,05 ABa

Diferentes letras minusculas en la misma columna indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre los tratamientos para cada día de medición y diferentes letras mayusculas en la misma fila indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre los días de almacenamiento utilizando la prueba HSD de Tukey. Desviación estandar incluida para n=3.

A temperatura de refrigeración el cambio en el color de los frutos se produce más lentamente dado a que la conservación a esta temperatura favorece el periodo fisiológico de los frutos y los hace más apetecibles al consumo, por la frescura que se evidencia.

No hay diferencia significativa entre colores para los diferentes tratamientos, pero si entre los días. Con respecto a la luminosidad en el día 5 bajo fuertemente pero para el día 11 la medicion volvio a subir y se mantuvo similar para los días 15 y 20. Para la coordenada a* no hay diferencia significativa entre los tratamientos pero si entre los dias de almacenamiento, teniendo en cuenta que los tratamientos no son los alterantes del color a esta temperatura de almacenamiento. Para la coordenada b* se evidencias cambios solo por el factor temporal igual que para las anteriores coordenadas. En la Tabla 4.3 evaluando el resultado de los tratamientos almacenados a 20 °C donde el indice de deterioro y cambio

de color es evidente puesto a que en estas condiciones la vida util de los frutos es menor, la fruta tiende a opacarse desde el incio del almacenamiento, perdiendo sus cualidades de color, evidenciando una caida en la luminosidad (L*) que al pasar los dias se mantenia o disminuia de manera similar. Lo que tambien ocurrio para la coordenada a* donde al pasar los dias los colores rojos se intensificaban, y la corodenada b* disminuia su coloracion amarilla, dado a que los frutos se opacaban y perdian su brillo en estas condiciones de almacenamiento.

Los cambios de color en la fresa almacenada a diferentes condiciones de temperatura de almacenamiento y tratamiento pueden deberse a diversos factores relacionados con las reacciones bioquímicas y físicas que ocurren durante el tiempo de almacenamiento (Schouten et al., 2007). Al ocurrir reacciones de pardeamiento a temperaturas altas (20 °C), las enzimas responsables del pardeamiento enzimático pueden estar más activas, lo que conlleva al oscurecimiento de la fruta. Al aumentar la actividad enzimática a estas temperaturas influye directamente en cambios de los valores L*, a* y b*. En cuanto a los cambios en la concentración de pigmentos las fresas contienen pigmentos como antocianinas, responsables de su coloración roja. Es por esto que el cambio en la concentración de estos pigmentos debido a procesos degradativos o reacciones químicas podrían afectar los valores de la coordenada a* (Ren et al., 2006). La respiración y el metabolismo a temperaturas más altas, puede aumentar, lo que podría influir en los cambios en los valores de color. La producción de compuestos volátiles y la liberación de pases puede afectar la apariencia física de la fruta.

Tabla 4.3 Evolución de las coordenadas de color CIELAB de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmosferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 20 °C y 60 % de HR.

Propiedad	Tratamiento	Día 0	Día 3	Día 5	Día 6	Día 7
Luminosidad (L*)	AM	36,68 ± 4,27 a	32,78 ± 0,21 Ab	29,51 ± 0,79 Ab	32,04 ± 2,72 Ab	32,67 ± 1,32 Ab
	25M		29,54 ± 0,80 Ab	31,86 ± 2,17 Ab	29,48 ± 3,38 Ab	30,77 ± 0,97 Ab
	50M		31,46 ± 0,88 Ab	28,03 ± 0,88 Ab	31,51 ± 4,95 Ab	30,40 ± 0,09 Ab
	100M		32,68 ± 0,78 Ab	27,64 ± 1,81 Ab	32,78 ± 1,49 Ab	31,18 ± 3,06 Ab
	100C+70E		31,08 ± 1,97 Ab	31,90 ± 1,62 Ab	32,67 ± 1,22 Ab	33,35 ± 1,55 Ab
	70E		31,95 ± 1,56 Ab	30,90 ± 1,91 Ab	34,43 ± 2,93 Ab	-
	100C		31,32 ± 1,38 Ab	31,31 ± 2,01 Ab	32,19 ± 1,49 Ab	28,25 ± 0,35 Ab

Coordenada (a*)	AM	33,26 ± 3,17 a	36,15 ± 1,11 Aa	33,44 ± 2,10 Aa	33,42 ± 1,88 Aa	35,80 ± 1,49 Aa
	25M		32,28 ± 1,97 Aa	34,43 ± 1,51 Aa	32,09 ± 1,66 Aa	31,76 ± 1,81 Aa
	50M		34,11 ± 2,58 Aa	27,99 ± 3,33 Aa	34,48 ± 2,65 Aa	32,19 ± 1,97 Aa
	100M		35,41 ± 2,18 Aa	31,00 ± 2,33 Aa	34,15 ± 1,76 Aa	31,19 ± 3,72 Aa
	100C+70E		34,96 ± 1,63 Aa	34,36 ± 1,88 Aa	34,61 ± 1,91 Aa	34,10 ± 2,15 Aa
	70E		34,42 ± 1,60 Aa	33,66 ± 2,82 Aa	35,34 ± 3,56 Aa	-
	100C		34,97 ± 0,64 Aa	28,63 ± 2,29 Aa	31,55 ± 3,65 Aa	25,67 ± 2,90 Aa
Coordenada (b*)	AM	21,28 ± 16,49 a	20,08 ± 1,16 ABa	17,34 ± 0,67 Ac	18,69 ± 4,20 ACb	19,80 ± 0,84 ACb
	25M		18,79 ± 1,61 ABa	18,68 ± 2,04 Ac	17,15 ± 1,03 ACb	18,39 ± 1,47 ACb
	50M		18,95 ± 0,80 ABa	13,42 ± 1,60 Ac	19,93 ± 3,17 ACb	16,93 ± 2,16 ACb
	100M		20,03 ± 0,53 ABa	15,74 ± 2,28 Ac	19,30 ± 1,84 ACb	18,54 ± 1,74 ACb
	100C+70E		18,76 ± 2,47 ABa	18,03 ± 2,09 Ac	18,33 ± 2,80 ACb	19,35 ± 3,28 ACb
	70E		19,51 ± 2,68 ABa	18,32 ± 0,69 Ac	17,99 ± 1,42 ACb	-
	100C		19,7 ± 2,02 ABa	15,97 ± 0,92 Ac	16,13 ± 3,89 ACb	14,63 ± 2,12 ACb

Diferentes letras minusculas en la misma columna indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre los tratamientos para cada día de medición y diferentes letras mayusculas en la misma fila indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre los días de almacenamiento utilizando la prueba HSD de Tukey. Desviación estandar incluida para n=3.

En este caso, como en la anterior temperatura los tratamientos no influyen en el comportamiento de la escala de color, es decir que no hay diferencias significativas, pero en los dias de medicion si hay cambio sustancial a partir del dia 3 con respecto a L*. Para a* ni los tratamientos ni los dias son significativos, al no verse afectada la escala de color verde-rojo. Para b* los tratamientos tampoco afectan el color.

Tabla 4.4 Firmeza a la penetración de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR y 20 °C y 60 % de HR.

Propiedad	Tratamiento	Día 0	Día 5	Día 11	Día 15	Día 20
Firmeza (N)	AM	4,8389 ± 0,73b	6,02 ± 1,27 ABa	5,55 ± 0,55 ABa	5,73 ± 0,72 ABa	5,88 ± 0,12 Aa
	25M		3,69 ± 0,42 ABa	5,72 ± 0,73 ABa	5,01 ± 1,07 ABa	6,06 ± 1,02 Aa
	50M		3,68 ± 0,075 ABa	4,94 ± 0,48 ABa	5,30 ± 0,63 ABa	6,85 ± 0,55 Aa
	100M		6,18 ± 0,69 ABa	5,86 ± 0,88 ABa	5,86 ± 0,88 ABa	7,32 ± 0,84 Aa
	100C+70E		5,34 ± 1,76 ABa	5,61 ± 0,38 ABa	6,12 ± 0,47 ABa	5,47 ± 0,47 Aa
	70E		6,52 ± 0,74 ABa	6,64 ± 0,60 ABa	5,47 ± 0,56 ABa	6,25 ± 0,09 Aa

	100C		7,32 ± 0,67 ABa	6,50 ± 0,98 ABa	6,24 ± 0,99 ABa	6,72 ± 0,12 Aa
Propiedad	**Tratamiento**	**Día 0**	**Día 3**	**Día 5**	**Día 6**	**Día 7**
Firmeza (N)	AM	4,8389 ± 0,73 a	4,91 ± 0,33 Aa	4, 56 ± 1,55 Aa	3,92 ± 0,26 Aa	3,88 ± 0,52 Aa
	25M		3,69 ± 0,42 Aa	3,85 ± 0,53 Aa	3,63 ± 0,23 Aa	6,06 ± 1,02 Aa
	50M		3,68 ± 0,08 Aa	3,90 ± 0,76 Aa	4,47 ± 0,45 Aa	6,85 ± 0,55 Aa
	100M		5,13 ± 0,35 Aa	5,07 ± 0,32 Aa	5,14 ± 0,52 Aa	3,28 ± 0,96 Aa
	100C+70E		4,18 ± 0,30 Aa	4,90 ± 0,39 Aa	3,51 ± 1,09 Aa	3,49 ± 0,58 Aa
	70E		4,05 ± 1,24 Aa	5,11 ± 0,49 Aa	3,86 ± 0,62 Aa	-
	100C		5,18 ± 1,35 Aa	4,54 ± 1,06 Aa	4,72 ± 0,73 Aa	3,05 ± 0,38 Aa

Diferentes letras minusculas en la misma columna indican diferencias significativas (p<0,05) entre los tratamientos para cada día de medición y diferentes letras mayusculas en la misma fila indican diferencias significativas (p<0,05) entre los días de almacenamiento utilizando la prueba HSD de Tukey. Desviación estandar incluida para n=3.

En el caso de la firmeza se observó una rápida disminución de los valores medidos para los frutos almacenados a 20 °C como se muestra en la Tabla 4.4. Para los frutos almacenados a 4 °C se observó también una pérdida paulatina de firmeza, pero menos pronunciada a lo largo del tiempo y no se evidenciaron diferencias significativas entre los tratamientos de empaque evaluados. Como se mencionó previamente, a mayor temperatura el consumo de sustratos y la perdida de humedad se intensifica lo que resulta en una mayor degradación de la estructura celular en el tejido de los frutos. Esto se observa en la mayor pérdida de firmeza a 20 °C respecto a 4 °C. Según (Ciro & Osorio, 2007) la fuerza de firmeza y la resistencia mecánica a la fractura disminuyen con el tiempo de poscosecha de la fruta, indicando que el fruto maduro es más susceptible al daño mecánico con respecto a la fruta verde y pintona. Por otra parte, los investigadores (Torres Morales & Pájaro González, 2015) encontraron que películas hechas a base de proteínas de soya y timol mejoraban la firmeza, ayudando a mantener el contenido de ácido ascórbico y los niveles de azúcar en las fresas empacadas. En el caso del uso de temperaturas de refrigeración, (Restrepo & Cortes, 2012) concluyeron que al usar películas comestibles hechas a base de gluten de trigo mejoraban la retención de firmeza, reducen las pérdidas de peso y muestran mejor calidad de vida útil. No hay efecto significativo de la firmeza a los 4°C de almacenamiento con respecto a los tratamientos, es decir son estadisticamente iguales pero si hay un cambio en el tiempo (días), este factor se ve alterado alrededor del día 15 y 20 de almacenamiento. Para 20 °C no hay efecto significativo ni para los tratamientos ni para los dias de almacenamiento, siendo este ultimo un factor muy estable con respecto a las mediciones tomadas.

Tabla 4.5 Evolución de actividad de agua, solidos solubles y acidez titulable de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR y a 20°C y 60 % de HR.

Propiedad	Tratamiento	Día 0	Día 5	Día 11	Día 15	Día 20
aw	AM	0,836 ± 0,007 b	0,872 ± 0,011 Aa	0,877 ± 0,006 Aa	0,86 ± 0,008 Aa	0,855 ± 0,003 Aa
	25M		0,915 ± 0,003 Aa	0,993 ± 0,001 Aa	0,961 ± 0,054 Aa	0,962 ± 0,007 Aa
	50M		0,921 ± 0,001 Aa	0,992 ± 0,001 Aa	0,992 ± 0,000 Aa	0,990 ± 0,004 Aa
	100M		0,887 ± 0,010 Aa	0,911 ± 0,002 Aa	0,906 ± 0,002 Aa	0,903 ± 0,002 Aa
	100C+70E		0,901 ± 0,005 Aa	0,885 ± 0,006 Aa	0,869 ± 0,011 Aa	0,863 ± 0,009 Aa
	70E		0,898 ± 0,008 Aa	0,897 ± 0,004 Aa	0,898 ± 0,004 Aa	0,875 ± 0,004 Aa
	100C		0,886 ± 0,001 Aa	0,909 ± 0,004 Aa	0,902 ± 0,002A a	0,912 ± 0,001 Aa
SST (°Brix)	AM	11,5 ± 0,23 a	10,2 ± 0,06 Ab	8,8 ± 0,68 Ac	8,6 ± 0,36 Acb	8,6 ± 0,31 Ac
	25M		9,2 ± 0,06 Ab	8,8 ± 0,06 Ac	9,0 ± 0,62 Acb	9,5 ± 0,44 Ac
	50M		8,7 ± 0,38 Ab	8 ± 0,10 Ac	9,0 ± 0,20 Acb	8,2 ± 0,68 Ac
	100M		9,3 ± 0,06 Ab	8,5 ± 0,10 Ac	9,4 ± 0,91 Acb	8,7 ± 0,06 Ac
	100C+70E		8,7 ± 0,21 Ab	9,0 ± 0,60 Ac	8,4 ± 0,46 Acb	9,2 ± 0,06 Ac
	70E		10,4 ± 0,42 Ab	8,8 ± 0,12 Ac	9,3 ± 0,30 Acb	8,6 ± 0,06 Ac
	100C		9,8 ± 0,06 Ab	9,2 ± 0,42 Ac	9,3 ± 0,55 Acb	8,6 ± 0,06 Ac
ATT	AM	2,2569 ± 0,37 b	2,7183 ± 0,37 Ba	3,516 ± 1,01 Ba	2,3907 ± 0,35 Ba	3,2794 ± 0,61 Ba
	25M		4,5253 ± 0,55 Aa	6,2643 ± 0,6 Aa	4,3853 ± 0,45 Aa	5,688 ± 0,6 Aa
	50M		6,4410 ± 0,48 Aa	5,0263 ± 0,37 Aa	4,3647 ± 0,2 Aa	5,426 ± 0,9 Aa
	100M		2,9856 ± 0,51 Ba	4,4927 ± 0,47 Ba	2,59± 0,51 Ba	3,0217± 0,7 Ba
	100C+70E		3,0319± 0,46 Ba	4,298± 0,76 Ba	2,058 ± 0,34 Ba	3,7603± 1,2 Ba
	70E		3,1320± 0,84 Baa	3,266 ± 0,27 Baa	4,662 ± 0,57 Baa	4,0065 ± 0,6 Baa
	100C		2,8643 ± 0,43 Baa	4,833 ± 0,54 Baa	3,9127 ± 1,76 Baa	4,3312 ± 1,2 Baa

Propiedad	Tratamiento	Día 0	Día 3	Día 5	Día 6	Día 7
aw	AM	0,836 ± 0,007 d	0,890 ± 0,002 Bc	0,898 ± 0,005 Bb	0,921 ± 0,007 Ba	0,922 ± 0,006 Ba
	25M		0,898 ± 0,003 Ac	0,926 ± 0,004 Ab	0,952 ± 0,001 Aa	0,969 ± 0,004 Aa
	50M		0,909 ± 0,005 Ac	0,916 ± 0,002 Ab	0,964 ± 0,005 Aa	0,986 ± 0,007 Aa
	100M		0,906 ± 0,002 BAc	0,924 ± 0,000 BAb	0,943 ± 0,001 BAa	0,928 ± 0,003 BAa
	100C+70E		0,895 ± 0,001 BAc	0,911 ± 0,004 BAb	0,93 ± 0,000 BAa	0,934 ± 0,004 BAa
	70E		0,898 ± 0,001 BAc	0,922 ± 0,001 BAb	0,936 ± 0,003 BAa	-
	100C		0,902 ± 0,002 BAc	0,927 ± 0,001 BAb	0,947 ± 0,001 BAa	0,936 ± 0,001 BAa
SST (°Brix)	AM		10,2 ± 0,10 Ab	10,0 ± 0,20 Ab	10,4 ± 0,20 Ab	9,7 ± 0,06 Ab

	25M		9,0 ± 0,15 Bb	8,8 ± 0,21 Bb	7,8 ± 0,23 Bb	8,5 ± 0,30 Bb
	50M		9,0 ± 0,21 Bb	8,9 ± 0,57 Bb	8,3 ± 0,06 Bb	8,6 ± 0,50 Bb
	100M	11,5 ± 0,23 a	10,3 ± 0,15 BAb	9,3 ± 0,15 BAb	9,5 ± 0,12 BAb	10,0 ± 0,06 BAb
	100C+70E		9,5 ± 0,36 BAb	9,1 ± 0,67 BAb	9,5 ± 0,06 BAb	9,1 ± 0,10 BAb
	70E		8,6 ± 0,06 BAb	10,2 ± 0,20 BAb	9,7 ± 0,51 BAb	-
	100C		9,0 ± 0,31 BAb	9,2 ± 0,38 BAb	8,8 ± 0,26 BAb	10,1 ± 0,10 BAb
ATT	AM	2,2569 ± 0,37 c	2,9087 ± 0,51 BAb	3,7756 ± 0,91 BAa	4,1093 ± 0,20 BAa	5,443 ± 0,82 BAa
	25M		5,2033 ± 0,61 Ab	5,94 ± 0,65 Aa	4,3417 ± 0,48 Aa	7,3537 ± 2,08 Aa
	50M		5,2590 ± 0,46 Ab	5,8567 ± 0,66 Aa	5,7580 ± 0,81 Aa	6,0453 ± 0,58 Aa
	100M		2,5449 ± 0,28 Bb	4,6997 ± 0,86 Ba	3,9380 ± 0,17 Ba	4,0840 ± 0,78 Ba
	100C+70E		2,5312 ± 0,43 BAb	4,5853 ± 0,81 BAa	4,7727 ± 1,00 BAa	4,912 ± 0,90 BAa
	70E		3,0297 ± 0,74 BAb	3,8027 ± 0,12 BAa	4,584 ± 0,77 BAa	-
	100C		2,4635 ± 0,46 BAb	4,5513 ± 0,46 BAa	4,924 ± 1,02 BAa	3,9897 ± 0,09 BAa

Diferentes letras minusculas en la misma columna indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre los tratamientos para cada día de medición y diferentes letras mayusculas en la misma fila indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre los días de almacenamiento utilizando la prueba HSD de Tukey. Desviación estandar incluida para n=3.

En la Tabla 4.5 se muestra el comportamiento de otras características fisicoquímicas de los frutos de fresa tales como aw, solidos solubles y acidez titulable para los diferentes tratamientos de empaque y temperaturas de almacenamiento. Para los valores obtenidos de aw, se observa que la medición tomada en el día cero, esta entre 0,8, y al pasar el tiempo incrementa hasta un máximo de 0,98 a_w para las dos temperaturas de almacenamiento para todos los tratamientos, esto dado a la ganancia de peso (agua) por la naturaleza del fruto. En cuanto a la concentración de solidos solubles en el día cero se tiene 11,5 % de solidos disueltos, lo que indica el cociente total de sacarosa en la muestra, y al pasar los días para las dos temperaturas de almacenamiento este disminuyo gradualmente en todas las mediciones a los diferentes días, lo que indica que su concentración de azúcar disminuía al potenciarse procesos de deterioro y cambio en los sabores dulces a ácidos o amargos.

En cuanto a la ATT, se mantuvo en todas las mediciones el pH de equilibrio 8,1, teniendo en cuenta que los niveles de acidez incrementaron al pasar del tiempo, pero se notan diferencias claras entre ellas porque no se da una consecuencia en los valores obtenidos, unos bajos, otros altos, y otros intermedios.

Se observa un efecto altamente significativo con respecto a los tratamientos a 4 °C y 80 % de HR, hay diferentes efectos diferenciales entre los tratamientos con respecto a la aw y de

los días; aplicando la prueba HSD de Tukey para el tratamiento 50M, seguido de 25M presentan mayor a_w y los de menor nivel de aw son AM, 100C, 70E, 100C+70E respectivamente. A partir del día 5 se genera un mayor efecto y su comportamiento se estabiliza para los siguientes días. Con respecto a los SST no hay diferencias significativas entre los tratamientos pero si entre los días de medicion, ocurriendo una alteración a partir del dia 5 y su comportamiento se iguala o mantiene similar para los siguientes días. Para ATT hay diferencia significativa donde los tratamientos con mayor ATT son 25M y 50M a partir del día 5, teniendo un comprtamiento fluctuante a partir de ese día hasta el día 20. Para los tratamientos a 20 °C y 60 % de HR e observa un cambio sustancial a partir del día 5, con respecto a °Brix se aparecia un efecto altamente significativo tanto para los tratamientos como para los días de almacenamiento donde AM presenta mayor nivel de °Brix a partir del día 5, obteniendo una reacción inmediata de cambios de las caracterisitcas fisicoquimicas para las dos temperaturas. Para ATT se nota un efecto altamente significativo con respecto al tratamiento y el tiempo presentando 25M y 50M los mas altos niveles de acidez a partir del día 5 y se esabiliza a partir del día 15.

4.2.3 Aceptabilidad sensorial

En el análisis sensorial de aroma realizado se evidenció un incremento paulatino en aromas asociados a la madurez que fueron siendo reemplazados por otros asociados a la pudrición y fermentación a lo largo del tiempo. Así mismo, en el caso de los frutos empacados con agentes activos el aroma de estos últimos se fue incrementando a lo largo del tiempo del ensayo hasta hacerse predominante en algunos casos. Para los frutos empacados con 25 y 50 mg de mentol el aroma natural de las fresas se preservo durante mayor tiempo a 4 °C y la presencia de la sustancia antimicrobiana se mantuvo en ligera o moderada durante todo el ensayo (Tabla 4.6). En el caso de los demás tratamientos si se evidenció el olor característico a cinamaldehído y a eugenol en la superficie de las fresas a partir del día 15 de almacenamiento. Para los frutos almacenados a 20 °C se observó un incremento notable en el aroma de las sustancias antimicrobianas en las fresas a partir del día 5 haciéndose predominante para el día 6. Para los frutos empacados en AM el aroma predominante fue a fermentación, también desde el día 5 de almacenamiento.

Tabla 4.6 Evaluación sensorial de aroma de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR y a 20 °C y 60 % de HR.

			4 °C y 80 % HR		
Tratamiento/día	**0**	**5**	**11**	**15**	**20**
AM		1	2	2	2
25M		1	2	2	2
50M		1	2	1	1
100M	0	1	1	2	2
100C+70E		2	1	3	3
70E		2	2	3	3
100C		1	1	2	3
			20 °C y 60 % HR		
Tratamiento/día	**0**	**3**	**5**	**6**	**7**
AM		1	3	3	3
25M		1	3	3	3
50M		1	3	3	3
100M	0	1	2	3	3
100C+70E		2	2	3	3
70E		2	3	3	3
100C		1	2	3	3

En este caso se evidencio que para los tratamientos a 20 °C a partir del día 5 todos los frutos empacados presentaron un sabor fuerte a cada una de las sustancias preservantes utilizadas, lo que indica una vez más que al incrementar la temperatura en el sistema de empaque la liberación de las sustancias preservantes se incrementa y así mismo su absorción por parte de los frutos empacados lo que los ace inadecuados para su consumo aun cuando no haya deterioro microbiano. En el caso de los tratamientos a refrigeración los cambios en el sabor no son tan pronunciados de forma similar a lo observado para el aroma y los frutos solo comienzan a verse afectados luego del día 10 de almacenamiento.

Para los tratamientos con mentol en cantidades de 25 y 50 mg se evidenció un efecto ligero a moderado en el sabor y aroma de los frutos tratados a 4 °C lo que sumado a los resultados previos de deterioro fúngico permite definir 50 mg de mentol como el tratamiento más apropiado a esta temperatura. A 20 °C, los cambios sensoriales fueron rápidos, pero en general el deterioro fúngico se produjo aún más rápido por lo que este factor resulta no influyendo en la vida útil de los frutos.

Tabla 4.7 Evaluación sensorial de sabor de los frutos de fresa para diferentes tratamientos de empaque activo solo con atmósferas modificadas (AM) e incluyendo cinamaldehído, aceite de clavo (eugenol) y mentol a 4 °C y 80 % de HR y a 20 °C y 60 % de HR.

			4 °C y 80 % HR		
Tratamiento/día	**0**	**5**	**11**	**15**	**20**
AM		1	1	2	2
25M		1	2	2	2
50M		1	1	2	2
100M	0	1	3	3	3
100C+70E		1	3	3	3
70E		1	3	3	3
100C		1	3	3	3
			20 °C y 60 % HR		
Tratamiento/día	**0**	**3**	**5**	**6**	**7**
AM		1	3	3	3
25M		1	3	3	3
50M		1	3	3	3
100M	0	1	2	3	3
100C+70E		1	2	3	3
70E		1	3	3	3
100C		1	2	3	3

En un estudio realizado por (Morales, 2015) caracterizaron aceite esencial de tomillo sobre la contaminación de *Listeria monocytogenes* en queso Ricotta, obteniendo como resultados sobre la caracterización organoléptica un olor característico, aromático e irritante, un sabor picante, penetrante y levemente irritante; destacan que los parámetros de calidad que deben cumplir los aceites esenciales no son claros y no están regulados, al ser catalogados como sustancias GRAS, su uso se limita; lo cual indica que faltan estudios que demuestren el impacto que genera el uso de aceites esenciales como conservantes de alimentos. Por otra parte, (Ospina et al., 2008) en su estudio, hablan sobre el efecto desfavorable del empobrecimiento en O_2 en la atmósfera generando fermentación propia en los frutos con alteraciones directas en el aroma y el sabor, generando así el descarte completo de la fruta.

4.2.4 Análisis microbiológico

En la Figura 4.5 parte A, se evidencia el resultado del aislamiento del hongo presente en los frutos de fresa para todos los tratamientos evaluados.

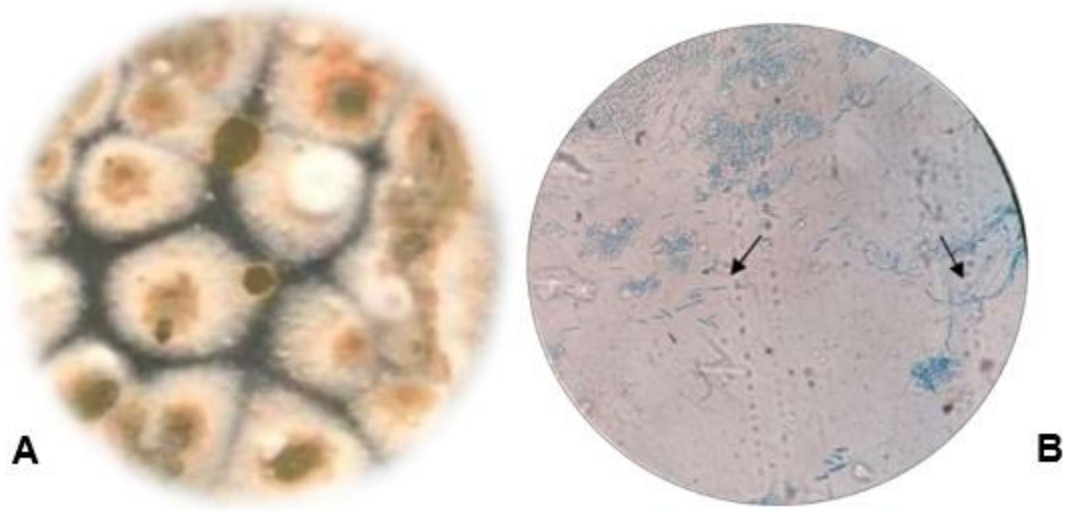


Figura 4.5 Aislamiento de hongos de fresa (A), observaciones microscópicas de hongos de fresa.

La evaluación microscópica se realizó con muestras previamente tratadas con azul de metileno en el microscopio trinocular Levenhuk Med-D45T a 10x y 40x (Figura 4.5 parte B). En estas observaciones se evidenciaron colonias color crema, esporuladas y con características similares a las reportadas por (Farrera et al., 2007) en estudios de identificación de *Botrytis cinerea*, de igual forma se observaron a nivel microscópico conidias que son aquellas esporas producidas asexualmente por el hongo conocidas como la fuente de inoculación primaria (primer origen o fuente de infección) Javanmardi et al., (2023). También se observan hifas hialinas y septadas que se dividen en compartimientos individuales por paredes transversales conocidas como septos, que contienen uno o más núcleos. La característica "hialina" hace referencia a la apariencia translúcida o vidriosa que se observa. Estas características pertenecientes al moho gris o Botrytis *cinerea* desempeña un papel crucial en la biología de los hongos al facilitar el crecimiento y la reproducción, al permitir una eficiente absorción y distribución de nutrientes contribuyendo a resistir a condiciones ambientales adversas (Costa et al., 2011).

En la Figura 4.6 se presenta el rotulado que se describe en la metodología para los tratamientos que fueron analizados microbiológicamente, donde se observa que los frutos empacados independientemente del tratamiento conservan su corona verde al pasar los días de almacenamiento, caso contrario al cuerpo de los frutos que ya presentaban

presencia de daño fúngico. Se realizó incubación microbiológica únicamente para estos tratamientos al ser estos los que más presencia de hongo contenían.

Figura 4.6 Rotulado de las muestras analizadas en los ensayos microbiológicos en fresa

En la Figura 4.7 se observa los resultados de este primer ensayo, evidenciando la presencia del hongo *Botrytis cinerea* en la dilución $1x10^{-2}$ del tratamiento 8.100C+70E, mientras que las demás diluciones presentaron crecimiento de levaduras. Lo que indica que para el previo tratamiento utilizando la mezcla (100µl cinamaldehído + 70µl eugenol + 2 g bentonita) no surgió efecto en cuanto a la inhibición de este microorganismo esto dado a que posiblemente la concentración que se usó de cada uno de los aceites no haya sido suficiente para inhibir el crecimiento del hongo, pudo no haber sido la óptima para tener un efecto inhibidor relevante, o por otra parte la efectividad del tratamiento pudo depender de las condiciones específicas de la siembra, como el tipo de medio de cultivo que se utilizó, la temperatura o duración de la incubación.

En el caso del crecimiento de las levaduras, se da por que las fresas maduras y sobrexpuestas pueden proporcionar un sustrato ideal para el crecimiento de estas, independientemente del tratamiento al que este expuesta, ya sea por condiciones desfavorables de almacenamiento como la temperatura y la humedad relativa. Em resumen, la presencia de levaduras en muestras de fresa puede ser el resultado de una combinación de factores ambientales, de manipulación y de almacenamiento que proporcionan un entorno propicio para su crecimiento (Nazzaro et al., 2017). En otro estudio sobre la actividad antifúngica de los aceites esenciales (Kalemba, 2003) los tratamientos

químicos son en gran medida eficaces, pero pueden desarrollar cepas resistentes y especies de hongos intrínsecamente resistentes. El inicio y nivel de gravedad de la infección por hongos depende de la carga del inoculo, el estado inmunológico del huésped y la resistencia.

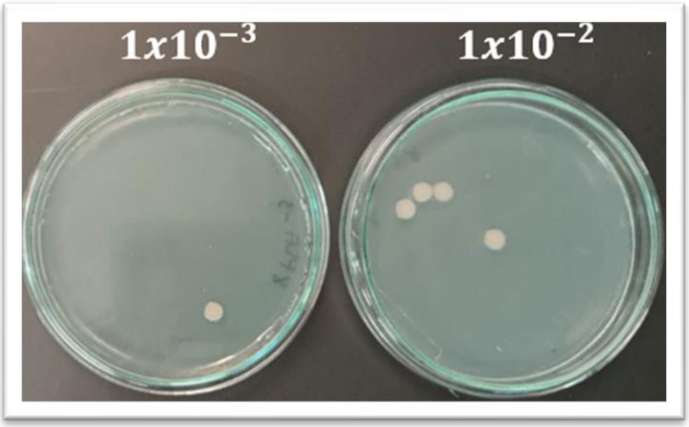


Figura 4.7 Resultados de la siembra del tratamiento 8.100C+70E para Botrytis cinerea

Para los tratamientos 1.70E, 8.100C+70E y 12.100M se dio la presencia del hongo en el tiempo de incubación, lo que se asocia a posibles daños asociados a este hongo sobre la calidad de la fruta (Figura 4.8). Lo que indica que estos tratamientos no mostraron suficiente eficiencia en la inhibición del microorganismo, esto posiblemente a que la concentración no fue óptima para combatir el hongo, pero al llegar a incrementarse la concentración se podría llegar a ocasionar daños en las características organolépticas de aceptación como el aroma y el sabor de todos los frutos de fresa empacada. (Espinosa et al., 2013) en su estudio evaluaron el efecto del tratamiento con aceite esencial de hojas de canela para el control de hongos de frutos de fresa trata tas con emulsiones de AHC (0.005 g μl^{-1} y almacenadas durante 9 días a 10 °C, se observó una inhibición significativa del ataque por hongos por efecto de los tratamientos, lo que indica que su aplicación parece ser un tratamiento viable para reducir el daño por hongos. En comparación con el presente estudio se logró determinar la presencia de hongos en fresas afectadas a partir de los 18 días de almacenamiento para los tratamientos mencionados anteriormente, es decir que tanto el estudio de los autores como el presente resulta ser efectivo en cierta medida.

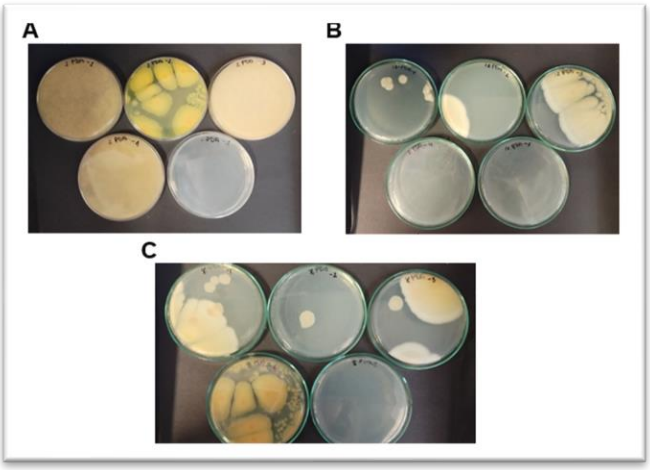


Figura 4.8 Resultados del segundo ensayo de siembra para Botrytis cinerea A) Tratamiento 1.70E. B) Tratamiento 12.100M C) Tratamiento 8.100C+70E.

Por otra parte, el tratamiento 5.AM presentó un crecimiento de hongos y levaduras en todas las diluciones evaluadas (Figura 4.9). Esto dado a que este tratamiento no contaba con la inclusion de agentes antimicrobianos ni adsorbentes de humedad, lo que indica que en cierta medida para los demás tratamientos evaluados que si contaban con la presencia de antifúngicos si se logró inhibir en cierta medida el desarrollo de microorganismos. En este caso la falta de adsorción de humedad en el espacio del empaque conllevo a que se desarrollaran libremente microorganismos y en la incubación microbiológica al no tener ningún efecto inhibitorio de protección se desarrollaron con normalidad.

Respecto a las diluciones que se describen en la Tabla 4.8 sobre la presencia o ausencia del hongo *Botrytis cinerea* se evidencia que para la disolución $1x10^{-4}$ y $1x10^{-5}$ ya se encuentra ausente el hongo para los tratamientos 7.100C, 12.100M y 8.100c+70E al generarse una reducción sistemática del microorganismo, mediante la resuspención sucesiva de la solución inicial , pero para las disoluciones $1x10^{-1}$, $1x10^{-2}$ y $1x10^{-3}$ se cuenta con la presencia del hongo para los cinco tratamientos evaluados lo que evidencia una mayor concentración de microorganismo presente.

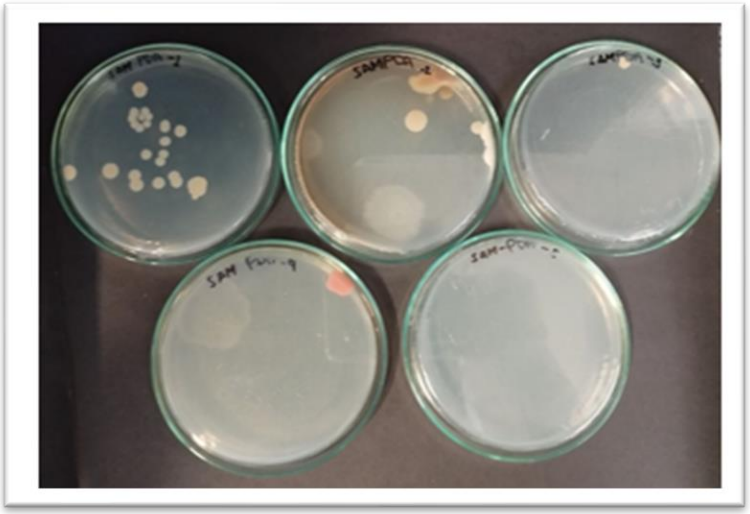


Figura 4.9 Resultados tratamiento 5.AM

Tabla 4.8 Presencia o ausencia de hongos en frutos de fresa.

MUESTRA	DILUCIONES				
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
7.100C	+	+	+	-	-
1.70E	+	+	+	+	-
12.100 M	+	+	+	-	-
8.100C+70E	+	+	+	+	-
5 AM	+	+	+	+	+

Mohammadi et al. (2015) en los resultados de su investigación demuestran el potencial de los aceites esenciales de canela y clavo de olor para el manejo de Botrytis cinerea, provocando reducción del crecimiento micelial con una dosis de 0.05 % en la cual la inhibición del crecimiento fúngico fue total. Lo que indica que a medida que se incrementa la dosis incrementa la efectividad en el caso del aceite de canela. En otro estudio (Brito et al., 2021) se evaluó el efecto de mezclas de los aceites esenciales de *Origanum vulgare* (orégano), *Thymus vulgaris* (tomillo), *Citrus limón* (limón) frente a *Botrytis cinerea* en poscosecha sobre frutos de tomate. Obteniendo como resultado que los efectos dependen de la dosis aplicada enfatizando que los aceites te tomillo y orégano son los más efectivos para reducir el crecimiento de este hongo, alcanzando inhibición completa de 400 a 600 ppm.

Los resultados fueron similares para todos los tratamientos, lo que indica que los aceites esenciales inhiben el crecimiento de microrganismos, pero no en su totalidad. En el caso

del tratamiento con mentol no resulto ser buen inhibidor del crecimiento de microorganismos, pero si favorable en factores fisicoquímicos, de vida útil y características organolépticas de aroma y sabor.

4.2.5 Conclusiones

De forma similar a lo observado para las pruebas descritas en los capítulos anteriores, la temperatura resultó ser la variable más estrechamente relacionada con la vida útil de las fresas empacadas obteniendo en promedio 3-4 veces más tiempo de preservación a 4 °C comparado con 20 °C. Respecto a las sustancias preservantes, para los empaques con 50 mg de mentol absorbidos en 2 g de bentonita se alcanzaron 25 días de preservación a 4 °C y 80 % de HR siendo este el mayor tiempo de inhibición del deterior fúngico obtenido en el estudio. Por otra parte a 20 °C y 60 % de HR se obtuvieron tiempos de preservación algo mayores a 5 días para los tratamientos con 100 mg de mentol, 100 µl de cinamaldehído y 100 µl de cinamaldehído + 70 µl de aceite esencial de clavo (con 70 % de eugenol). El efecto combinado del mentol y el aceite esencial de clavo con eugenol no resultó en un incremento en la preservación respecto al uso individual de cinamaldehído en los sachets con bentonita a ambas temperaturas.

Para los parámetros fisicoquímicos se observaron cambios significativos en el color de las fresas a 20 °C, indicando una mayor actividad enzimática y reacciones de pardeamiento. En cuanto a la firmeza de las fresas almacenadas a 4 °C se mantuvo, mostrando una perdida mínima de textura, mientras que a 20 °C se evidencio una disminución notoria de la firmeza en poco tiempo. Para SST disminuyeron con el tiempo, indicando cambios en los sabores dulces a medida que avanza el proceso de deterioro. Para a_w aumento con el tiempo debido a la ganancia de peso por la naturaleza del fruto, afectando las propiedades del mismo.

En cuanto a la aceptabilidad sensorial el aroma y sabor de los frutos para los tratamientos con 50 mg o menos de mentol tuvo una afectación de ligera a moderada en comparación con los demás tratamientos a temperatura de refrigeración. A 20 °C, luego del día 3 de almacenamiento todos los tratamientos presentaron un aroma y sabor fuerte a cada sustancia preservante incluida en los tratamientos como consecuencia de la liberación más rápida de sustancias en el interior del empaque y de su posible difusión acelerada en los frutos empacados.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Como resultado de las diferentes pruebas realizadas se obtuvo un empaque biodegradable de PLA en el cual se integraron un sistema de atmósferas modificadas y un sachet con bentonita adsorbente y una sustancia antifúngica volátil de liberación controlada.

El uso de atmósferas modificadas (AM) en el sistema de empaque resultó ser beneficioso para la preservación de los frutos, especialmente a bajas temperaturas. En este caso, la microperforación hecha en la película de PLA facilitó el intercambio de gases para incrementar la conservación de los frutos. Además, la aplicación de modelos matemáticos de respiración fue una herramienta útil para determinar la intensidad respiratoria de las fresas y de este modo ayudar a determinar la atmósfera modificada adecuada.

Para la preservación de los frutos de fresa en fresco, la temperatura de almacenamiento es fundamental puesto que a temperaturas como 20 °C la velocidad de respiración y de otros procesos metabólicos relacionados al deterioro se hace muy alta para una preservación efectiva con el sistema de empaque activo.

Este estudio destaca la eficacia de la bentonita, especialmente a una cantidad óptima de 2 g, en la adsorción de humedad para regular de manera eficiente el almacenamiento de fresas a diversas temperaturas. Además, se resalta la importancia de encontrar un equilibrio entre la capacidad de adsorción y la deshidratación en sistemas de empaque. En relación con los aceites esenciales, se enfatiza su impacto antimicrobiano, destacando el mentol puro como eficaz en la inhibición de microorganismos, aunque se advierte sobre consideraciones sensoriales, especialmente en frutas sin barrera protectora, como las fresas en este estudio.

La configuración del sistema de empaque activo más satisfactoria fue aquella con una microperforación de 545 µm en la película de PLA y con la inclusión de 2 g de bentonita como matriz adsorbente mezclada con 50 mg de mentol en los sachets, obteniendo un tiempo de preservación de 25 días a 4° C y 80 % de HR.

A condiciones ambientales (20 °C y 60 % de HR), el incremento en la vida útil fue inferior alcanzando algo más de 5 días de preservación para los tratamientos con 100 mg de mentol, 100 µl de cinamaldehído y 100 µl de cinamaldehído + 70 µl de eugenol comparado con 2 días de vida útil para frutos almacenados sin empaque.

Los parámetros fisicoquímicos, como cambios en color, textura, SST y a_w, revelaron diferencias notables entre las condiciones de almacenamiento, evidenciando la influencia del sistema de empaque activo en el mantenimiento de la calidad de las fresas. Además, la aceptabilidad sensorial indicó que, a altas temperaturas, el sistema de empaque activo no logra preservar completamente el aroma y sabor natural de las fresas, siendo el tratamiento con mentol menos perceptible en aroma a temperatura de refrigeración.

5.2 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos se sugieren las siguientes líneas de actuación para profundizar en la aplicación del sistema de empaque activo propuesto para la preservación de fresa:

Por un lado, deben complementarse los ensayos de AM para los frutos de fresa especialmente a temperaturas intermedias y definir los requerimientos de permeación o transferencia de O_2 y CO_2 a partir de la cinética de respiración ajustada en este trabajo.

Es recomendable contemplar la evaluación de cantidades intermedias de mentol entre 25 y 50 mg para una masa similar de fresa empacada con el fin de reducir la incidencia en la alteración del aroma y sabor natural de los frutos por la absorción de la sustancia preservante. También debe continuarse buscando entre sustancias preservantes de origen natural que puedan mantener capacidades antifúngicas iguales o superiores manteniendo un balance con los atributos sensoriales de los frutos para lograr la aceptación por parte del consumidor.

A partir de los resultados obtenidos puede explorarse la optimización de mezcla de bentonita y agentes preservantes y la cantidad a disponer dentro del sistema activo en función del tipo, característica y cantidad de producto.

Bibliografía

Aguilar, M., & Arriaga, F. (2019). Influence of packaging on quality of fresh fruits and vegetables. *Food Research International*, *123*, 246–259.

Ahmed, S., Anwar, F., & Shahid, S. A. (2014). Evaluation of antioxidant activity and phenolic content in different genotypes of strawberry (Fragaria × ananassa Duch.). *Journal of Food Science and Technology*, *51*(9), 2190–2198.

Alegre, I., Herrera, A., Martínez, J. A., & Laglaoui, A. (2017). Microbiota of strawberries (Fragaria x ananassa) in the north of Morocco: isolation, identification and characterization. *Annals of Microbiology*, *67*(1), 73–84.

Almenar, E., Del-Valle, V., Hernández-Muñoz, P., Lagarón, J. M., Catalá, R., & Gavara, R. (2007). Equilibrium modified atmosphere packaging of wild strawberries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *87*(10), 1931–1939. https://doi.org/10.1002/jsfa.2938

Almenar, E., Hernández-Muñoz, P., Del Valle, V., Velez, D., & Gavara, R. (2006). Effect of chitosan coating combined with postharvest calcium treatment on strawberry (Fragaria × ananassa) quality during refrigerated storage. *Food Chemistry*, *97*(3), 436–445.

Amaya, D., Díaz, D., & Rivera, J. (2016). Modelación de la respuesta de la fresa a la temperatura y la humedad relativa del aire en el altiplano cundiboyacense, Colombia. *Agronomía Colombiana*, *34*(2), 162–170.

Amiri, A., Heath, S. M., & Peres, N. A. (2019). Preharvest and postharvest factors affecting Botrytis cinerea decay of strawberry fruit: a review. *Plant Disease*, *103*(12), 3064–3074.

Arana, I., & Hernández, A. (2018). Advances in packaging for fresh fruits and vegetables: a review. *Journal of Food Science and Technology*, *55*(9), 3373–3384.

Arévalo-Pineda, A. F., Restrepo-Sánchez, L. P., & Villada, H. S. (2018). Desarrollo de un empaque activo con aceite esencial de orégano para prolongar la vida útil de la carne de pollo. *Revista Lasallista de Investigación*, *15*(1), 100–107.

Arrieta-Baez, D., Romero-Bastida, C. A., Paredes-López, O., & González-Córdova, A. (2018). Empaques activos y su impacto en la conservación de frutas y hortalizas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *19*(2), 267–282.

Artes, F., Gómez, P., & Aguayo, E. (2000). Quality changes in fresh-cut fruits and vegetables as affected by temperature and type of packaging. *Journal of Food Science, 65*(5), 70–64.

Azevedo, S., Cunha, L. M., Mahajan, P. V, & Fonseca, S. C. (2011). Application of simplex lattice design for development of moisture absorber for oyster mushrooms. *Procedia Food Science*, *1*, 184–189. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.029

Ballester-Sánchez, J., Cano-Lamadrid, M., H.-H. M., Gavara, R., & Hernández-Muñoz, P. (2017). Efecto de los aceites esenciales como conservantes naturales en alimentos: una revisión. *Revista de Agroindustria*, *3*(6), 91–102.

Belay, Z. A., Caleb, O. J., Mahajan, P. V, & Opara, U. L. (2017). Application of simplex lattice mixture design for optimization of active modified atmosphere for pomegranate arils (cv. Wonderful) based on microbial criteria. *Food Packaging and Shelf Life*, *14*, 12–17. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.08.002

Bello, R., Guerrero, L., & Pedreschi, F. (2018). Evaluación sensorial de alimentos: metodología y aplicaciones. *Santiago de Chile: Editorial Universitaria.*

Beltrán, J., & Gómez, A. (2017). Desarrollo y evaluación de empaques activos para la conservación de la calidad de frutas frescas. *Revista de Investigación En Ciencia y Tecnología de Los Alimentos*, *22*, 67–75.

Bonghi, C., Trainotti, L., Botton, A., & Tadiello, A. (2011). Biochemical and molecular aspects of fruit ripening and senescence in Fruits, Vegetables, and Herbs. *Woodhead Publishing*, 109–134.

Brash, D. W., Charles, C. M., Wright, S., & Bycroft, B. L. (1995). Shelf-life of stored asparagus is strongly related to postharvest respiratory activity. *Postharvest Biology and Technology*, *5*(1), 77–81. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0925-5214(94)00017-M

Brito, C., Hansen, H., Espinoza, L., Faúndez, M., Olea, A. F., Pino, S., & Díaz, K. (2021). Assessing the Control of Postharvest Gray Mold Disease on Tomato Fruit Using Mixtures of Essential Oils and Their Respective Hydrolates. *Plants*, *10*(8), 1719. https://doi.org/10.3390/plants10081719

Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in food: a review. *International Journal of Food Microbiology*, *94*(3), 223–253.

Calvo, A., & Rojas-Grau, M. A. (2018). The use of moisture absorbers in packaging for fresh fruits and vegetables: A review. *Food Engineering Reviews*, *10*(3), 132–149.

Campos-Vargas, R, Oñate-Sánchez, L., & Gardea, A. A. (2013). Control of fruit senescence by natural and modified atmosphere storage. *Journal of Food Science, 2*(78), 244–250.

Capocasa, F., Battino, M., & Mezzetti, B. (2012). Effect of genotype, cultivation system and postharvest storage on the antioxidant capacity and phenolic compounds of strawberry (Fragaria x ananassa) fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *92*(6), 1205–1214.

Castrillon, N., Mercado, A., & Volzone, C. (2018). Influencia del calcio en la retención de humedad por arcilla. *Matéria (Rio de Janeiro)*, *23*(2). https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0432

Castro-Vargas, H. I., Álzate-González, J., Gómez-Arias, G., & Villada, H. S. (2019). Aceites esenciales en la conservación de alimentos: una revisión. *Revista Chilena de Nutrición*, *46*(5), 564–574.

Cerqueira, M. A., Gomes, A. C., Teixeira, J. A., & Vicente, A. A. (2017). Active and intelligent food packaging: modern packaging technologies for enhancing food functionality. In Food packaging and preservation. *CRC Press*, 237–258.

Chaves-López, C., Serio, A., Grande-Tovar, C. D., Rossi, C., & Paparella, A. (2014). Uso de aceites esenciales como conservantes naturales de alimentos: una revisión. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, *64*(2), 156–168.

Choi, I. H., & Kim, S. B. (2019). Cinnamaldehyde as a potential natural antimicrobial in food preservation: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *99*(13), 6531–6539.

Chung, D., Papadakis, S. E., & Yam, K. L. (2003). Simple models for evaluating effects of small leaks on the gas barrier properties of food packages. *Packaging Technology and Science*, *16*(2), 77–86. https://doi.org/10.1002/pts.616

Cortés, L. A., Herrera, A. O., & Castellanos, D. A. (2022). Natural plant-based compounds applied in antimicrobial active packaging and storage of berries. *Journal of Food Processing and Preservation*, *46*(11). https://doi.org/10.1111/jfpp.16995

Cortés, L. A., Moncayo, D. C., & Castellanos, D. A. (2023). Development of an antimicrobial packaging system for fresh cape gooseberry (Physalis peruviana L.) fruits. *Food Packaging and Shelf Life*, *38*, 101113. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101113

Cortés L, Moncayo D. C, & Castellanos D. A. (2023). Development of an antimicrobial active packaging system for fresh cape gooseberry (Physalis peruviana L.) fruits. *Food Packaging and Shelf Life, In Peer Review*.

Costa, A. R. T., Amaral, M. F. Z. J., Martins, P. M., Paula, J. A. M., Fiuza, T. S., Tresvenzol, L. M. F., Paula, J. R., & Bara, M. T. F. (2011). Acción del aceite esencial de Syzygium aromaticum (L.) Merr. & L.M.Perry sobre las hifas de algunos hongos fitopatógenos. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, *13*(2), 240–245. https://doi.org/10.1590/S1516-05722011000200018

De Mello, S., Daza, L., & Oliveira, M. (2019). Efectividad de la bentonita en la protección de la calidad de productos alimentarios. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *23*(11), 854–859.

Duque, S. R., Ospina, C. A., & González, C. A. (2019). Evaluación de un empaque activo con carbón activado y celulosa microcristalina para la conservación de uchuva (Physalis peruviana L.). *Agronomía Colombiana*, *37*(1), 47–55.

Escobar, H. J., Garavito, J., & Castellanos, D. A. (2023). Development of an active packaging with an oxygen scavenger and moisture adsorbent for fresh lulo (Solanum quitoense). *Journal of Food Engineering*, *349*, 111484. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2023.111484

Farrera, R. E. Z. A. E. (2007). *Characterization of associate fungi to strawberry fruit diseases at the Jauregui municipality, Tachura State. 24*(2), 269–281.

Fennell, A., & Dun, C. (1989). The strawberry: history, breeding and physiology. *Springer Science & Business Media.*

Ferreira, M. V, Goulão, L. F., Silva, A. P., & Pereira, J. A. (2014). Botanical description, taxonomy, genetic resources and breeding of Fragaria spp. In: Ferreira, M.V. and Strawberry, Fruit and Plant Development, Growth and Responses to Environment. *Nova Science Publishers, Inc., New York.*

Fonseca, S. C., Oliveira, F. A. R., & Brecht, J. K. (2002). Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *Journal of Food Engineering*, *52*(2), 99–119. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00106-6

Gallego-Jaramillo, M. F., Calderón-Ospina, C. A., & Rodríguez-Páez, J. E. (2018). Evaluación de un empaque activo con zeolita para la conservación de la fresa (Fragaria x ananassa). *Agronomía Colombiana*, *36*(2), 174–181.

Galvis-Sánchez, A., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2014). Effect of edible coatings and films on physical, chemical, sensory, microbiological and antioxidant properties of fresh and minimally processed fruits and vegetables. *Food Science and Technology International*, *20*(3), 195–206.

Gaona-Forero, A., Agudelo-Rodríguez, G., Herrera, A. O., & Castellanos, D. A. (2018). Modeling and simulation of an active packaging system with moisture adsorption for fresh produce. Application in 'Hass' avocado. *Food Packaging and Shelf Life*, *17*, 187–195. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.07.005

Garavito, J., Mendoza, S. M., & Castellanos, D. A. (2022). Configuration of biodegradable equilibrium modified atmosphere packages, including a moisture absorber for fresh cape gooseberry (Physalis peruviana L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, *314*, 110761. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2021.110761

García, J., Sánchez, L., & Gil, M. (2010). Conservación de frutas frescas mediante el control de la atmósfera de almacenamiento. *Producción y Comercialización de Frutas y Hortalizas*, 169–186.

García P, Ruiz, M., & Barreiro, P. (2016). Métodos de conservación post-cosecha de la fresa: una revisión. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, *17*(1), 1–12.

Gelal, A. (2008). Influence of menthol on first pass elimination. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, *7*(2), 119–124. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85670210

Gómez, J. M., Mendoza, S. M., Herrera, A. O., & Castellanos, D. A. (2020). Evaluation and modeling of changes in color, firmness, and physicochemical shelf life of cut pineapple (Ananas *comosus*) slices in equilibrium-modified atmosphere packaging. *Journal of Food Science*, *85*(11), 3899–3908. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15469

González-Aguilar, G., Villa-Rodriguez, J., Ayala-Zavala, J., Olivas, G., & Álvarez-Parrilla, E. (2017). Agentes antimicrobianos naturales para la conservación de alimentos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *16*(3), 975–989.

González-Buesa, J., & Salvador, M. L. (2022). A multiphysics approach for modeling gas exchange in microperforated films for modified atmosphere packaging of respiring products. *Food Packaging and Shelf Life*, *31*, 100797. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100797

Guédez Clemencia AND Cañizalez, L. A. N. D. C. C. A. N. D. O. R. A. N. D. M. M. (2010). Alternativas para el control de hongos postcosecha en naranjas valencia (Citrus sinensis). *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, *30*, 43–47. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562010000100009&nrm=iso

Gutiérrez-López, G. F., Hernández-Montiel, L. G., & Rojas-López, M. (2016). Efecto de la temperatura y la humedad relativa sobre la tasa de transpiración y el peso fresco de fresa 'Camarosa.' *Revista Mexicana de Agronegocios*, *39*, 967–977.

Gutiérrez-Pacheco, M., & Ponce-García, N. (2019). Effect of clove essential oil on the preservation of fresh-cut apple. *Journal of Food Quality*, *2019*, 1–9.

Hernández, D. A., & Sandoval, A. J. (2018). Poscosecha de fresa en Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *12*(2), 470–481.

Imsabai, W., Ketsa, S., & van Doorn, W. G. (2006). Physiological and biochemical changes during banana ripening and finger drop. *Postharvest Biology and Technology*, *39*(2), 211–216. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.10.001

Janjarasskul, T., & Suppakul, P. (2018). Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *58*(5), 808–831. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1225278

Javanmardi, Z., Koushesh Saba, M., Nourbakhsh, H., & Amini, J. (2023). Efficiency of nanoemulsion of essential oils to control Botrytis cinerea on strawberry surface and prolong fruit shelf life. *International Journal of Food Microbiology*, *384*, 109979. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109979

Jiang, Y., & Joyce, D. C. (2003). Effects on ethylene production, PAL activity, anthocyanin and phenolic contents of strawberry fruit. *Plant Growth Regulation, 39*(2), 171–174.

Joshi, K., Tiwari, B., Cullen, P. J., & Frias, J. M. (2019). Predicting quality attributes of strawberry packed under modified atmosphere throughout the cold chain. *Food Packaging and Shelf Life*, *21*, 100354. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100354

Kafkas, S., Kosma, I., & Özcan, S. (2015). Soil salinity and yield of strawberry. *International Journal of Agriculture and Biology*, *17*(5), 1075–1070.

Kalemba, D. D. D. K., & K. A. (2003). Antibacterial and antifungal properties of essential oils. *Current Medicinal Chemistry, 10*(10), 813–829.

Kartal, S., Aday, M. S., & Caner, C. (2012). Use of microperforated films and oxygen scavengers to maintain storage stability of fresh strawberries. *Postharvest Biology and Technology*, *71*, 32–40. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.04.009

Kasperbauer, M. J., & Wang, S. (2001). Light reflected from red mulch to ripening strawberries affects aroma, sugar and organic acid concentrations. *Photochemistry and Photobiology Sciences* , 103–107.

Kessel Domini, A. (2012). MEJORA GENÉTICA DE LA FRESA (FRAGARIA ANANASSA DUCH.), A TRAVÉS DE MÉTODOS BIOTECNOLÓGICOS. *Cultivos Tropicales*, *33*(3), 34–41. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193223814005

Ktari, N., Smaoui, S., Chakchouk-Mtibaa, A., & Mahjoubi, M. (2019). Characterization and antifungal activity of yeasts isolated from Tunisian fresh strawberries. *Brazilian Journal of Microbiology*, *50*(2), 487–496.

Kurekci, C., & Padmanabhan, P. (2021). Antimicrobial activity of clove (Syzygium aromaticum L.) essential oil on selected foodborne pathogens in a model system. *LWT*, *152*, 112248.

Kyriacou, M. C., & Rouphael, Y. (2018). Enhancement of postharvest quality and safety of fresh produce by plant essential oils and smoke compounds. *Acta Horticulturae*, *1194*, 243–250.

Lee, D. S., & Kim, D. H. (2016). Oxygen concentration control for fresh-cut produce storage. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *56*(11), 1937–1950.

Liu, C., Fang, Z., Deng, X., Xu, J., Ye, X., & Wei, Y. (2015). Physicochemical changes of strawberries during storage and their shelf-life prediction. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(4), 2284–2294.

Liu, H., F. Y., L. D., & X. W. (2017). Investigation of Active MAP Film with Menthol on Sugar Orange Preservation. *Advanced Graphic Communications and Media Technologies,* 643–650.

López, C. A., & Hoyos, R. (2017). Evaluación de la calidad poscosecha de fresas en diferentes empaques y condiciones de almacenamiento. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *11*(2), 357–368.

López-Valencia, O., & Ciro-Velásquez, H. J. (2018). Evaluación de la calidad postcosecha de la fresa (Fragaria spp.) en diferentes empaques de almacenamiento. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *12*(1), 123–133.

Mahajan, P. V, & Goswami, T. K. (2001). PH—Postharvest Technology: Enzyme Kinetics Based Modelling of Respiration Rate for Apple. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *79*(4), 399–406. https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0718

Majowicz, S. E., Musto, J., Scallan, E., Angulo, F. J., Kirk, M., & O'Brien, S. Jh. G. (2010). The global burden of nontyphoidal Salmonella gastroenteritis. *Clinical Infectious Diseases*, *50*(6), 882–889.

Martínez J AND Sulbarán de Ferrer, B. A. N. D. O. de R. G. A. N. D. F. A. A. N. D. N. R. (2003). Actividad antibacteriana del aceite esencial de mandarina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, *20*, 502–512. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182003000400010&nrm=iso

Martínez J, Velázquez V, Hernández V, & Martínez J. (2016). Evaluación de películas a base de almidón con bentonita como agente estabilizador en la conservación de zanahorias (Daucus carota L.). *Agronomía Mesoamericana*, *27*(1), 41–51.

Martínez-González, M. E., Balois Morales, R., Alia-Tejacal, I., Cortes-Cruz, M. A., Palomino-Hermosillo, Y. A., & López-Guzmán, G. G. (2017). Postcosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *19*, 4075–4087. https://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.674

Medina E, Arroyo N, & Rodríguez F. (2013). Caracterización sensorial de la fresa: relación entre la percepción y los componentes volátiles. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, *10*(1), 40–48.

Medina K, Ríos M, & Sandoval M. (2017). Metabolismo secundario en fresa y sus efectos en la salud. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *8*(4), 909–924.

Miró, R., & Torres, J. (2017). Innovaciones en envasado de frutas y hortalizas frescas. *Horticultura*, *360*, 36–42.

Mohammadi, A., Hashemi, M., & Hosseini, SM. (2015). The control of Botrytis fruit rot in strawberry using combined treatments of Chitosan with Zataria multiflora or Cinnamomum zeylanicum essential oil. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(11), 7441–7448. https://doi.org/10.1007/s13197-015-1871-7

Montoya, J. E. Z., Cuartas, C. A., & Restrepo, C. (2018). Modelamiento de la respiración del mango (Mangifera indica l.) usando el método de sistema cerrado a diferentes temperaturas. *Revista Brasileira de Fruticultura*, *40*(3). https://doi.org/10.1590/0100-29452018126

Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., & Feo, V. De. (2017). Essential Oils and Antifungal Activity. *Pharmaceuticals*, *10*(4). https://doi.org/10.3390/ph10040086

Ortiz Texon, J. A., Delgadillo Martínez, J., Rodríguez Mendoza, M. de las N., & Calderón Zavala, G. (2016). Inoculación bacteriana en el crecimiento y calidad del fruto de cinco variedades de fresa en suelos con pH contrastante. *Terra Latinoamericana*, *34*(2), 177–185. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57345272002

Osorio M, Martínez J, Moreno R, & López A. (2015). Efecto del recubrimiento con quitosano y aceites esenciales en la calidad de fresas almacenadas a diferentes temperaturas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *6*(7), 1473–1484.

Ospina Meneses, S. M., & Cartagena Valenzuela, J. R. (2008). La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos. *Revista Lasallista de Investigación*, *5*(2), 112–123. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=695502

Páez, R., Zanini, S. F., Castro, M. A., & Guerrero, S. N. (2017). Evaluación del efecto de empaques activos con agentes antimicrobianos en la calidad de frutillas. . *Revista Argentina de Microbiología*, *49*(3), 268–273.

Peirotén, Á., Grande, M., Arnedo, A., Andrés A, & Viñas, I. (2013). Microbiological quality of fresh strawberries from integrated pest management and organic farming. *Food Microbiology*, *36*(2), 192–198.

Pérez, M., & Rojas, C. (2008). Efecto de la humedad relativa y de la presencia de agua líquida en la proliferación microbiana en frutas y hortalizas frescas. . *Revista de Tecnología e Higiene de Los Alimentos*, *393*, 51–54.

Pérez-Gago, M., Serra, M., Del Río, M., Oms-Oliu, G., & Palou, L. (2006). Modified atmosphere packaging of minimally processed 'Hass' avocado: effect of film permeability on quality attributes. *Postharvest Biology and Technology*, *42*(3), 254–261.

Ramírez, M. E., Gallegos, E. J., & Escobar, E. (2014). Evaluación de empaques de poliestireno expandido para fresa (Fragaria x ananassa) en almacenamiento refrigerado. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *8*(1), 97–107.

Ren, K., Tu, K., Pan, L., & Chen, Y. (2006). Kinetic modelings of broccoli color changes during chilled storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, *30*(2), 180–193. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2006.00058.x

Rivas, A., & Rodríguez, M. (2020). Análisis de la calidad de los empaques de poliestireno expandido para la conservación de productos frescos en el mercado minorista. *Revista de Investigación En Ciencias de La Alimentación*, *35*, 23–30.

Rodríguez, A. M., Rodríguez, A., Pérez, D., & Abreu, Y. (2019). Efecto de la aplicación de aceites esenciales de canela y orégano en el control de Salmonella sp. y Escherichia coli O157:H7 en filetes de tilapia. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo*, *51*(1), 37–48.

Rodríguez Sauceda, E. N. (2011). USO DE AGENTES ANTIMICROBIANOS NATURALES EN LA CONSERVACIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS. *Ra Ximhai*, *7*(1), 153–170. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46116742014

Ruiz Candy AND Díaz, C. A. N. D. R. R. (2015). Composición química de aceites esenciales de 10 plantas aromáticas peruanas. *Revista de la Sociedad Química del PerÃº*, *81*, 81–94. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2015000200002&nrm=iso

Rusková, M., Opálková Sisková, A., Mosnácková, K., Gago, C., Guerreiro, A., Bucková, M., Puskárová, A., Pangallo, D., & Antunes, M. D. (2023). Biodegradable Active Packaging Enriched with Essential Oils for Enhancing the Shelf Life of Strawberries. *Antioxidants*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/antiox12030755

Sánchez-Sevilla, J. F., Navarro-González, I., García-Parra, J., & Amorós, A. (2007). Colour components and their relationship with quality parameters in strawberry. *Food Chemistry*, *104*(1), 319–325.

Sanz, C., Olivas, R., & Pérez, A. G. (2002). Quality Assessment of Strawberries Packed with Perforated Polypropylene Punnets During Cold Storage. *Food Science and Technology International*, *8*(2), 65–71. https://doi.org/10.1106/108201302024604

Schouten, R. E., Huijben, T. P. M., Tijskens, L. M. M., & van Kooten, O. (2007). Modelling quality attributes of truss tomatoes: Linking colour and firmness maturity. *Postharvest Biology and Technology*, *45*(3), 298–306. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.03.011

Segura, M. (2017). Tecnología del envase y embalaje en la industria alimentaria. *Zaragoza: Acribia*.

Silva-Espinosa, B. A. , O.-R. L. A. , G.-A. Gustavo A. , O. I. & A.-Z. J. F. (2013). Protección antifúngica y enriquecimiento antioxidante de fresa con aceite esencial de hoja de canela. *Revista Fitotec. Mex* , *36*(3), 217–224.

Solís-Quispe, L., Solís-Quispe, J. A., Aragon-Alencastre, L. J., Fernández, M. D., Hernández, I., Rodeiro, I., & Pino, J. A. (2017). Composición química y actividad antioxidante de aceites esenciales de Tanacetum vulgare y Mentha x piperita L. var. vulgaris cultivados en Cusco, Perú. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, *48*(1), 41–47. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181654080007

Soria, A. C., Villarreal, N., & De Greef, D. (2015). Influencia de la humedad en la supervivencia y crecimiento de microorganismos en frutas y hortalizas frescas. *Food Science and Technology International*, *21*(1), 38–47.

Soria, F., Medina, J., & Bañón, S. (2015). Efectos de la temperatura y la humedad relativa en el rendimiento y calidad de la fresa. *Acta Horticulturae*, *1079*, 187–192.

Soroka W. (2002). *Fundamentals of packaging technology. Institute of Packaging Professionals*.

Suppakul, P., Miltz, J., Sonneveld, K., & Bigger, S. (2003). Active packaging technologies with an emphasis on antimicrobial packaging and its applications. *Journal of Food Science*, *68*(2), 408–420.

Torres-Chati Jane AND Quispe, J. A. N. D. T.-C. G. (2017). Actividad antibacteriana y antifúngica de extractos de hojas de Luma chequen (Molina) A. Gray Arrayan frente a patógenos de origen clínico. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, *37*, 10–16.http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562017000100004&nrm=iso

Torres-Giner, S., & Lagarón, J. M. (2017). Active and intelligent packaging in food industry. In Advances in Food and Nutrition Research. *Academic Press*, *81*, 209–246.

Trujillo, J. C., & Ligarreto, G. A. (2014). Efecto de la madurez de la fruta sobre la vida poscosecha de la fresa (Fragaria x ananassa Duch) en condiciones de

almacenamiento refrigerado. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *8*(2), 297–305.

Valdés-Pérez, O., Borrego-Alonso, S., Vivar-González, I., Anaya-Villalpanda, M., & Molina-Veloso, A. (2016). Actividad antifúngica del aceite esencial de clavo de olor en el control del biodeterioro fúngico de documentos. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, *47*(2), 78–85. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181245821002

Valencia-Villalobos, J., Hernández-Montiel, L., & Gutiérrez-López, G. (2016). Efecto de la temperatura y la humedad relativa en la calidad poscosecha de fresa 'Camarosa.' *Revista Mexicana de Agronegocios*, *39*, 781–794.

Wang, J., Yang, X., Zhang, Y., Dong, C., & Yu, J. (2015). Effects of packaging with moisture absorber on postharvest quality of cherry tomato. *Food Science and Technology Research*, *21*(6), 871–878.

Wang, S. Y., & Lin, H. S. (2000). Compositional characteristics and antioxidant activities of strawberries grown in Florida. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *48*(5), 140–146.

Zhang, H., Shi, Y., Xu, X., Zhang, M., & Ma, L. (2020). Structure Regulation of Bentonite-Alginate Nanocomposites for Controlled Release of Imidacloprid. *ACS Omega*, *5*(17), 10068–10076. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00610

Zhou, H., & Lin, D. (2019). Determination of respiration rate, transpiration rate and physiological responses of strawberries during storage. *Journal of Food Science and Technology*, *56*(5), 2565–2573.

Anexo A. Ponencia oral. Congreso internacional de ingeniera química. WCCE11. Buenos Aires, Argentina, 2023.

BUENOS AIRES 2023
JUNE 4 - 8

WCCE11 - 11th WORLD CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING
IACCHE - XXX INTERAMERICAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING
CAIQ2023 - XI ARGENTINIAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING
CIBIQ2023 – II IBEROAMERICAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING
Buenos Aires - Argentina - June 4-8, 2023

"The global chemical engineering working for a better future world"

CERTIFICATE OF ATTENDANCE

THIS CERTIFIES THAT

Yurany Rocio Mahecha Rubiano

HAS ATTENDED THE WCCE11 - 11TH WORLD CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING

Buenos Aires - June 2023

Dr. Noemí Zaritzky
President of the Scientific Committee - WCCE11

Ing. Oscar Pagola
President of the Organizing Committee WCCE11

ORGANIZED BY: ASOCIACIÓN ARGENTINA DE INGENIEROS QUÍMICOS Centro para la Seguridad de los Procesos Químicos

PROMOTED AND SUPPORTED BY: WCEC World Chemical Engineering Council