UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación de sistemas de empaque biodegradables con atmósferas modificadas en equilibrio para frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.)

Nelsy Johanna Garavito Jejen

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Área Curricular de Alimentos y Agroindustria

Bogotá, Colombia

2021

Evaluación de sistemas de empaque biodegradables con atmósferas modificadas en equilibrio para frutos de uchuva *(Physalis peruviana* L*).*

Nelsy Johanna Garavito Jejen

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Director:

Dr. Aníbal Herrera Arévalo

Codirector:

Dr. Diego Alberto Castellanos

Línea de Investigación:

Calidad y Empaques para Alimentos

Grupo de Investigación:

'Horticultura', Facultad de Ciencias Agrarias

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Área Curricular de Alimentos y Agroindustria

Bogotá, Colombia

2021

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”.
-Albert Einstein

Donde reposa siempre mi corazón y motivación:

ΑμρλανΩι

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.

Johanna G.

Nelsy Johanna Garavito Jejen

Fecha: 05/10/2021

Agradecimientos

A mi familia, por su incondicional apoyo y motivación durante este proceso.

Al profesor Aníbal Herrera por su acompañamiento y dirección durante el desarrollo de este proyecto.

Al profesor Diego A. Castellanos, por su paciencia, por la entrega de su tiempo y conocimientos e invaluable contribución para la construcción de este trabajo y mi formación académica.

A mis compañeros de investigación, por sus números aportes, ideas y ayudas.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y su laboratorio de Calidad y Poscosecha de Productos Agrícolas, por el apoyo brindado durante la realización de este proyecto.

A la fundación Juan Pablo Gutiérrez Cáceres y la Universidad Nacional de Colombia por otorgarme la beca que hizo posible mi formación como magister.

Al Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e innovación (Colciencias) por la financiación de esta investigación a través de la Segunda Convocatoria 827 de 2018: "Convocatoria de innovación entre actores del sistema regional-departamento de Boyacá-2018, proyecto No 66121, subvención 80740-554-2019".

Resumen

Evaluación de sistemas de empaque biodegradables con atmósferas modificadas en equilibrio para frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L)

En este proyecto se planteó el desarrollo de empaques biodegradables con atmosferas modificadas en equilibrio (EMAP) para la preservación de frutos de uchuva provenientes de la región de Ventaquemada Boyacá. Inicialmente, se determinaron las cinéticas de respiración de frutos frescos de uchuva en función de la temperatura usando modelos de Ley de Potencias (LP), Michalis-Menten (MM) y Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2 (MMA). Con este último se encontró un alto grado de ajuste que fue mayor al de los otros modelos ($R^2_{adj.}$ = 0,964 y 0,981 para O_2 y CO_2 respectivamente). Para la transpiración de los frutos, se estableció primero un modelo logístico que describe la isoterma de sorción del fruto relacionando el cambio en actividad de agua con la humedad ($R^2_{adj.}$ = 0,998) y un modelo combinado de transpiración en donde se combina lo anterior con la cinética de pérdida de peso y el modelo de respiración más efectivo ($R^2_{adj.}$ = 0,999). Una vez determinadas las cinéticas de respiración y transpiración, se realizó la configuración de un sistema de empaque favorable para los frutos de acuerdo con sus cinéticas metabólicas. El sistema de empaque fue conformado por un cuerpo semirrígido y una película termosellada en la parte superior. Se evaluaron tres tipos de materiales, dos biodegradables: ácido poliláctico (PLA/PLA), celulosa (Cel/Cel) y un empaque de tereftalato de polietileno y polipropileno monorientado (PET/PP). Se realizó una microperforación en las películas (58 µm) para controlar la concentración de O_2 dentro del empaque. Los frutos de uchuva fueron almacenados a 6 °C y 75 % HR, obteniendo un tiempo máximo de conservación de 42 días para los frutos en PLA/PLA y 39 días en Cel/Cel, mayores a que aquellos almacenados en PET/PP (35 días) y los frutos control (sin atmosfera modificada) que llegaron a 21 días. Los empaques propuestos pueden contribuir a la reducción de pérdidas poscosecha, la ampliación de posibilidades comerciales y la generación de residuos ambientalmente sostenibles.

Palabras clave: Uchuvas, respiración, transpiración, empaques, PLA, celulosa, poscosecha.

Abstract

Evaluation of biodegradable packaging systems with modified atmospheres in equilibrium for cape gooseberry (Physalis peruviana L) fruits

In this project, the development of biodegradable packaging with equilibrium modified atmospheres (EMAP) was proposed for the preservation of cape gooseberry fruits from the region of Ventaquemada in Boyacá. Initially, the respiration kinetics of fresh cape gooseberry fruits were determined as a function of temperature by using Power Law (LP), Michalis-Menten (MM), and Michaelis-Menten with anticompetitive inhibition by CO_2 (MMA) models. A high degree of fit was found with the latter, which was higher than that of the other models ($R^2_{adj.}$ = 0,964 and 0,981 for O_2 and CO_2, respectively). For fruit transpiration, a logistic model was used to describe the fruit sorption isotherm relating the change in water activity with moisture content ($R^2_{adj.}$ = 0,998), and a combined transpiration model was established combining the above with the weight loss kinetics and the most effective respiration model ($R^2_{adj.}$ = 0,999). Once the respiration and transpiration kinetics were determined, a favorable packing system for the fruits was configured according to their metabolic kinetics. The packaging system consisted of a rigid tray and a heat-sealed film on the top. Three types of materials were evaluated, two biodegradables: polylactic acid (PLA/PLA), cellulose (Cel/Cel), besides a plastic packaging made of polyethylene terephthalate and monoriented polypropylene (PET/PP). one microperforation was made in the films (58 µm) to control the O_2 concentration inside the package. The cape gooseberry fruits were stored at 6 °C and 75 % relative humidity (RH), obtaining a maximum shelf life of 42 days for fruits in PLA/PLA and 39 days for Cel/Cel, longer than those stored in PET/PP (35 days) and the control fruits (without modified atmosphere) which reached 21 days. The proposed packaging can contribute to the reduction of postharvest losses, the expansion of commercial possibilities, and the generation of environmentally sustainable waste.

Keywords: Fresh cape gooseberry, respiration, transpiration, packaging, PLA, cellulose, postharvest.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XIV**

Lista de Símbolos y abreviaturas ..... **XV**

Introducción **1**

1 Capítulo 1 Revisión de literatura **5**
1.1 Empaques en alimentos 6
1.2 Uso de plástico en empaques 6
1.3 Empaques ambientalmente sostenibles 7
1.4 Empaques para frutas 8
1.5 Características de los materiales de empaque para frutas 10
1.6 Sistemas cerrados de empaque 12
1.7 Empaque para frutos de Uchuva 14
Referencias 18

2 Capítulo 2. Un modelo matemático combinado para representar la transpiración, la respiración y los cambios en la actividad del agua en frutas frescas de uchuva *(Physalis peruviana* L.*)* **27**
Resumen 27
2.1 Introducción 28
2.2 Materiales y métodos 30
2.2.1 Frutos de uchuva 30
2.2.2 Determinación experimental de la velocidad de respiración 30
2.2.3 Determinación experimental de la velocidad de transpiración 31
2.2.4 Modelamiento matemático de la cinética de respiración 32
2.2.5 Regresión de los parámetros de la cinética de la respiración 34
2.2.6 Cinética de transpiración 35
2.2.7 Acoplamiento de la cinética respiratoria al modelo de transpiración 36
2.2.8 Influencia de la temperatura en la velocidad de transpiración 37
2.2.9 Cálculo de la actividad de agua en la fruta 37
2.2.10 Regresión de parámetros para el cálculo de la actividad de agua y la cinética de transpiración 38
2.3 Resultados 39

2.3.1 Modelado respiración en uchuva....39
2.3.2 Modelado actividad de agua y transpiración en uchuva....44
2.3.3 Cinética de transpiración....45
2.3.4 Prueba de Validación....49
2.4 Conclusiones....51
Referencias....51

***3* Capítulo 3. Configuración de empaques biodegradables con atmósfera modificada en equilibrio (EMAP) para frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L*.)*....57**
Resumen....57
3.1 Introducción....57
3.2 Materiales y métodos....59
3.2.1 Material vegetal....59
3.2.2 Materiales de embalaje....59
3.2.3 Caracterización de los materiales de empaque....59
3.2.4 Modelamiento de la transferencia de gases a través de las películas....61
3.2.5 Configuración y diseño experimental de la prueba de almacenamiento....64
3.2.6 Evaluación de las propiedades de calidad de los frutos de uchuva durante almacenamiento refrigerado....65
3.2.7 Análisis estadístico....66
3.3 Resultados....67
3.3.1 Permeabilidad y propiedades de los materiales de embalaje....67
3.3.2 Comportamiento de las concentraciones de gases en los empaques....69
3.3.3 Evaluación de propiedades de calidad de la uchuva durante el almacenamiento 70
3.3.4 Vida útil del fruto y sistema de empaque más adecuado....76
3.4 Conclusiones....79
Referencias....79

4 Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones....85
4.1 Conclusiones....85
4.2 Recomendaciones....86

5 Referencias....87

Anexo A: Poster. Congreso Iberoamericano CIIAL 2020....89

Anexo B: Ponencia oral. Congreso colombiano de Ingeniería Química 2020....91

Anexo C: Seminario universitario. Tunja 2020....93

Anexo D: Artículos científicos publicados 2021....95

Lista de figuras

Pág.
Figura 1.1 Tabla de color de la uchuva 15
Figura 1.2 Empaque para mercado nacional (izquierda) y de exportación (derecha). 15
Figura 2.1 Evolución de las concentraciones de O_2 (izquierda) y CO_2 (derecha) a diferentes temperaturas 40
Figura 2.2 Cambios en el consumo de O_2 (izquierda) y las tasas de producción de CO_2 (derecha) de los frutos de uchuva en función de la fracción molar de O_2 a diferentes temperaturas. 41
Figura 2.3 Cambios en el contenido de humedad en función de la actividad de agua para frutos de uchuva. 44
Figura 2.4 Velocidad de transpiración (A) y pérdida de peso acumulada (B) de frutos de uchuva a diferentes HR y 10,5 °C. 47
Figura 2.5 Velocidad de transpiración (A) y pérdida de peso acumulada (B) de frutos de uchuva a temperaturas diferentes y 75% de humedad relativa. 48
Figura 2.6 Pérdida de peso acumulada de frutos de uchuva a diferentes HR y 17 °C. 50
Figura 3.1 Prototipo de empaque EMAP para frutos de uchuvas 64
Figura 3.2 Concentración de O_2 y CO_2 experimental (símbolos) y predicha (líneas) en los sistemas de empaque del PP/PET, PLA/PLA y Celulosa/Celulosa con frutos de uchuva a 6 °C y 75 % HR. 69
Figura 3.3 Pérdida de peso acumulada (símbolos) y predicha (líneas) en los sistemas de empaque del PP/PET, PLA/PLA, Celulosa/Celulosa y control para frutos de uchuva a 6 °C y 75 % HR.. 71
Figura 3.4 Condensación de agua en la superficie de película de empaque PP/PET 72
Figura 3.5 Evolución de coordenadas de color a* y b* 75
Figura 3.6 Seguimiento visual a los sistemas de empaque del PP/PET, PLA/PLA y Celulosa/Celulosa con frutos de uchuva almacenados a 6 °C y 75 % HR. 77

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1.1 Coeficientes de permeabilidad (cm^3 mm m^{-2} atm^{-1} d^{-1}) a 20°C de los materiales de empaque....12
Tabla 2.1 Parámetros de respiración estimados para los modelos ley de potencia, Michaelis-Menten simple y Michaelis-Menten anticompetitivo con inhibición CO_2 y Arrhenius para frutos de uchuva....43
Tabla 2.2 Parámetros estimados para el modelo de transpiración, incluida la estimación de la actividad de agua de uchuva. Desviación estándar (DE) para n = 3....44
Tabla 3.1 Coeficientes de permeabilidad calculados a 6 °C utilizando la ecuación de Arrhenius. Desviación estándar (DE) incluida para n = 4. 67
Tabla 3.2 Evolución de las propiedades de calidad de los frutos de uchuva bajo diferentes condiciones de empaque a 6 °C y 75 % HR....73
Tabla 3.3 Evolución de las propiedades de color de los frutos de uchuva bajo diferentes condiciones de empaque a 6 °C y 75 % HR....74
Tabla 3.4 Evolución de la firmeza de los frutos de uchuva bajo diferentes condiciones de empaque a 6 °C y 75 % HR....76

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Termino	Unidad
α	Fracción de calor respiratorio que efectivamente resulta en la evaporación del agua	
ATT	Acidez titulable	%
aO_2 y aCO_2	Orden aparente de reacción de las especies O_2 y CO_2	
a_w	Actividad de agua	
$a_{w1/2}$	Actividad de agua de rotación media que corresponde al punto en el que la curva de datos cambia de dirección.	
a*	CIELAB coordenada de color rojo (+) /verde (−)	
A	Área de transferencia	
b*	CIELAB coordenada de color amarillo (+) /azul (−)	
bO_2 y bCO_2	Orden aparente de reacción	
Cel	Celulosa	
CO_2	Dióxido de carbono	
d	Días	
$\frac{dW_f}{dt}$	Pérdida de peso en el tiempo	
E	Energía liberada en la combustión	2816 kJ
E_a	Energía de activación, ecuación de Arrhenius	kJ mol^{-1}
EMAP	Atmosferas modificadas en equilibrio	
F	Firmeza	N
HR	Humedad relativa	%
H_2O	Agua	
q	Calor efectivo de respiración usado en la transferencia de humedad	kJ kg^{-1} d^{-1}

Símbolo	Termino	Unidad
K_m	Parámetro del modelo Michaelis-Menten simple	
k	Coeficiente de transferencia de masa	kg kg^{-1} h^{-1}
kf	Coeficiente de transferencia masiva de vapor de agua	*kf*
KmO_2 y $KmCO_2$	Constante de disociación de la enzima-complejo de sustrato	
k_{O2}, k_{CO2}	Coeficientes	cm^3 kg^{-1} d^{-1}
K_{TR}	Velocidad de transferencia de gas a través de las perforaciones	cm^3 d^{-1}
$K_{TRO2,}$ $K_{TR}CO_2$ y $K_TH_{R2}O$	Tasas de permeación de cada gas a través de las perforaciones en los empaques	cm^3 d^{-1}
L*	Coordenada de luminosidad CIELAB	
L	Espesor de película	
LDPE	Polietileno de baja densidad	
LP	Cinética Ley de Potencias	
M_0	Contenido inicial de humedad	
Me	Humedad de equilibrio	
MAP	Empaque con atmosfera modificada	
mg kg^{-1} (ppm)	Partes por millón	mg kg^{-1}
mm	Milímetro	mm
MM	Cinética Michaelis-Menten Simple	
MMA	Cinética Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2	
N_2	Nitrógeno	
O_2	Oxigeno	
PET	Tereftalato de polietileno	
PLA	Ácido poliláctico	
P	Presión	kPa
PP	polipropileno monorientado	
R	Constante universal de gases (0.008314)	kJ mol-^{1} K^{-1}
R^2_{adj}	Coeficiente de determinación ajustado	
r_{H2O}	Tasa de transpiración	kg kg^{-1} d^{-1}
r_{O2}, r_{CO2}	Tasa de consume de O_2 y producción de CO_2	cm^3 kg^{-1} d^{-1}

Símbolo	Termino	Unidad
r_{O2}^{max}, r_{CO2}^{max}	Maximum O_2 consumption and CO_2 production rates	$cm^3\ kg^{-1}\ d^{-1}$
q_r	Calor respiratorio del fruto	
Q_{CO2}, Q_{H2O}, Q_{O2}, Q_{N2},	Coeficientes de permeabilidad dióxido de carbono, agua, oxigeno, nitrógeno.	$cm^3\ mm\ m^{-2}\ atm^{-1}\ d^{-1}$
t	Tiempo	d
T	Temperatura	K
Tref	Temperatura de referencia	K
s	Segundos	
SST %	Solidos solubles totales	w/w
V	Volumen libre del empaque (cm^3),	cm^3
W	Peso de la fruta	Kg
Ws	Peso seco de la fruta	Kg
WL	Pérdida de peso del fruto	Kg
y_{O2}, y_{CO2}, yH_2O_{out} y yN_{2out}	Concentración fracción molar O_2, CO_2, H_2O y N_2	
yO_{2out}, yCO_{2out}, yH_2O_{out} y yN_{2out}	Concentración externa en fracciones molares	
λ	Calor latente de evaporación de agua	$kJ\ kg^{-1}$

Introducción

Actualmente la generación de residuos sólidos se ha convertido en un tema de interés global debido al acelerado ritmo de producción de las industrias y el creciente nivel de consumo. Se estima que para el año 2050 se tendrá un crecimiento del 70% de los residuos sólidos a nivel mundial, equivalentes a 3400 millones de toneladas, de las cuales aproximadamente el 44% corresponden a la industria de alimentos y el 22% a desechos plásticos (Kaza *et al*., 2018). En promedio ocho millones de toneladas de estos residuos llegan a los mares y océanos anualmente (Greenpeace, 2016), compuestas en gran medida por elementos plásticos. Por ejemplo, para el año 2020 se proyectaban alrededor de mil millones de objetos de naturaleza plástica arrojados a estos cuerpos de agua (Garay, 2019). Las alarmantes cifras expuestas representan la necesidad de medidas drásticas y replanteamientos sobre la generación y gestión responsable de residuos.

El desarrollo y tecnificación en la industria de alimentos ha originado aumentos en la producción de residuos ya que cada vez se tienen nuevos requerimientos de practicidad, innovación e inocuidad, que han propiciado en gran medida la inclusión de empaques de un solo uso de poca conveniencia ambiental (Martinez, 2016), siendo los materiales plásticos de origen petroquímico los más demandados para este fin debido a su versatilidad, costo, disponibilidad y las diferentes propiedades de protección que otorgan a alimentos de diferente naturaleza (Enguix, 2017). Sin embargo, el uso de dichos materiales ha resultado insostenible a través de los años, representando hoy día una gran fuente de contaminación mundial (Gómez-Serrano, 2016; Illanes Esparza, 2004) y la capacidad que tienen de incorporarse durante dichos procesos de degradación en forma de micro plásticos y nano plásticos en cuerpos de agua, tierra, animales y el ser humano (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019b), generando así un impacto negativo de grandes proporciones sobre la salud y el medio ambiente. Indiscutiblemente hay que considerar que la implementación de empaques no ha sido en vano y resulta necesaria dadas las altas pérdidas

de productos alimenticios en el mundo, que para el año 2019 se estimó un desperdicio de 931 millones de toneladas, las cuales representan el 17% de la producción mundial de alimentos (United Nations Environment Programme, 2021). Según la FAO (2019a) los sistemas de envasado y empaque adecuado pueden evitar las pérdidas al proteger y aumentar los períodos de conservación, aunque esto significa un desecho adicional al final del servicio, este se considera viable si se evitan detrimentos de productos cuya producción ha implicado una alta huella ambiental.

Entre tanto, en Colombia según datos del Departamento Nacional de Planeación (DNP) se pierden y desperdician anualmente de 9.76 millones de toneladas de alimentos, el equivalente al 34% de la producción total del país, atribuyendo la mayoría a las cadenas de frutas y vegetales (62%) y de raíces y tubérculos (25%) (DNP, 2020). Siendo esto consecuencia del carácter perecedero de dichos productos, los cuales después de la cosecha mantienen procesos metabólicos activos como la respiración y transpiración, responsables en gran medida del deterioro como en cualquier organismo vivo. Durante la respiración las frutas y hortalizas consumen las reservas de azúcares que disponen y como resultado liberan dióxido de carbono, agua y energía, la cual se expresa en forma de calor. Este proceso está ligado a las condiciones extrínsecas como la manipulación, la humedad relativa y la temperatura, siendo estos factores determinantes en la velocidad metabólica, la pérdida de calidad y vida útil del producto (Hernández *et al*., 2010; Orrego, 2001).

Así las cosas, los productos agrícolas frescos se convierten en un desafío de conservación, teniendo en cuenta las múltiples variables a controlar después de la cosecha y las implicaciones ambientales atribuidas al uso de empaques. Actualmente el mercado nacional está compuesto por una gama amplia de materiales que apuntan principalmente a la protección contra daños mecánicos, pero no hacia la necesidad de controlar los diferentes aspectos que ocasionan el deterioro sin hacer menos el bienestar ambiental al final del servicio. En consecuencia, en la industria surge la necesidad de establecer sistemas de empaque alternativos, hechos con materiales que sean ambientalmente sostenibles y que generen control sobre los aspectos que detonan los procesos de degradación. Por ejemplo, los empaques biodegradables se caracterizan por la capacidad que tienen sus estructuras para mineralizarse con la acción de microrganismos en cortos periodos de tiempo, siendo una opción viable para el remplazo de materiales sintéticos tradicionales, se han encontrado

materiales orgánicos aptos tecnológicamente para el desarrollo de empaques, de origen animal como el colágeno y la gelatina, de origen marino como el quitosano, de origen agrícola como lo son algunos lípidos e hidrocoloides o de origen microbiano como el ácido poliláctico y los polihidroxialcanoatos (Villada *et al*., 2007). Sin embargo, el campo de aplicación de dichos materiales depende directa y principalmente de su estabilidad en el tiempo, el comportamiento mecánico y de transporte de gases, si su aplicación apunta al sector hortofrutícola, donde usualmente resulta útil el uso de contenedores con atmosferas modificadas, cuya función es contribuir a la conservación de las frutas al obtener el equilibrio entre la respiración del producto y la atmosfera exterior aprovechando la permeabilidad de los materiales (Soleno, 2017).

El desarrollo de un prototipo de esta naturaleza resulta prometedor para la conservación de productos frutales como la uchuva, cuyos volúmenes de producción, consumo y exportación en Colombia van en aumento en los últimos años (Castiblanco, 2018). Este tipo de bayas requieren de sistemas de empaque más robustos, que les permitan una vida útil más larga y menores pérdidas a lo largo de la cadena poscosecha, generando el crecimiento del mercado nacional y la mejora de la percepción de la calidad. La uchuva resulta un producto estratégico para el sector agroindustrial, para el 2019 fue el quinto fruto de exportación del país y Colombia ocupa el primer lugar en producción en América latina. Respecto al 2015 la exportación tuvo un aumento aproximado del 40%, concentrando la producción en los departamentos de Boyacá (40,1%), Cundinamarca (31,1%) y Antioquia (10,4%) (Asociación Nacional de Exportadores [ANALDEX], 2018; Gaitán *et al*., 2018; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2018; Procolombia, 2020).

Objetivos de la tesis

Con las consideraciones que se han hecho en la introducción, el objetivo de esta tesis fue evaluar materiales poliméricos biodegradables alternativos para la preservación de la calidad y aumento de la vida útil de frutos de uchuva frescos en sistemas de empaque con atmósferas modificadas en equilibrio. Para alcanzar el objetivo de la investigación se establecieron los siguientes objetivos específicos: 1) caracterizar las propiedades mecánicas , de transporte de gases y la estabilidad de los materiales de empaque biodegradables seleccionados (celulosa y ácido poliláctico); 2) determinar las cinéticas de respiración y transpiración de frutos de uchuva frescos a través de modelamiento matemático; 3) configurar las perforaciones y

condiciones favorables para el sistema de empaque propuesto y 4) establecer el comportamiento de la calidad fisicoquímica y vida útil de los frutos de uchuva en los sistemas de empaque biodegradables evaluados.

Estructura de la tesis

Este estudio se divide en cuatro capítulos, además de la introducción. En el capítulo 1, se hizo una revisión de literatura pertinente y acorde con la temática de empaques a abordar y el fruto a trabajar. En el capítulo 2, se desarrolla el modelamiento matemático para describir la respiración y transpiración del fruto contemplando los cambios de actividad acuosa y humedad en el mismo. En el capítulo 3, se presenta la configuración de los sistemas de empaque propuestos, el comportamiento de los gases al interior de ellos (EMAP) y los cambios en la calidad fisicoquímica y la vida útil de los frutos de uchuva empacados al ser almacenados bajo condiciones de refrigeración. (6°C y 75%HR). Finalmente, en el capítulo 4, se exponen las principales conclusiones y se sugieren recomendaciones para futuros desarrollos

La información adicional relacionada con las presentaciones en eventos científicos y publicaciones realizadas durante la construcción de esta tesis se encuentra en los anexos.

Este trabajo se desarrolla dentro del proyecto “Evaluación y configuración de un sistema integrado de empaque biodegradable con actividad antifúngica y control de humedad para productos agrícolas frescos” financiado por COLCIENCIAS en la SEGUNDA CONVOCATORIA DE INNOVACIÓN ENTRE ACTORES DEL SISTEMA REGIONAL-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ (827–2018).

Capítulo 1 Revisión de literatura

La tendencia de consumo de los productos alimenticios ha cambiado a través del tiempo de forma significativa, actualmente la industria se inclina por satisfacer las necesidades de manera integral, contemplando los aspectos nutricionales y la calidad del producto sin dejar a un lado la innovación, la practicidad, la competitividad y ámbitos importantes como la responsabilidad ambiental y social (Del Greco, 2010). Por lo anterior, el desarrollo e inclusión de sistemas empaque se vuelve imprescindible durante la comercialización de un producto. En el sector de alimentos este factor ha tomado gran importancia para el consumidor ya que se espera que este elemento además de contener el producto sea un mecanismo de protección diferenciador, útil, informativo y se convierta en una herramienta conveniente para productores, distribuidores y consumidores (Escobar, 2018).

La producción y comercialización de productos hortofrutícolas en Colombia esta rezagada en gran medida por la falta de desarrollo del sector y la desigualdad en el aprovechamiento de tierras. Sin embargo, el país tiene un amplio potencial para ser una despensa agrícola del mundo teniendo en cuenta las perspectivas de crecimiento mundial en los próximos años, las cuales apuntan a una mayor disposición e ingreso de tierras a este ambiente productivo (FAO, 2014, 2017; MADR, 2018). Actualmente, según Procolombia, (2019) el consumo aparente de las frutas en el país alcanzó 9,7 millones de toneladas, presentando un crecimiento del 20,5% respecto a 2015, así como las exportaciones colombianas de estos productos han tenido un crecimiento compuesto anual del 7% en los últimos 5 años.

Frutas como la uchuva (*Physalis peruviana* L.) ha adquirido gran importancia en el país por su potencialidad para la exportación como fruta fresca e igualmente su consumo interno se ha incrementado paulatinamente debido a que el consumidor nacional aprecia sus propiedades nutricionales y organolépticas. Para el año 2019, la producción de uchuva en el país superó las 18 mil toneladas, de las cuales se exportaron cerca de 9 mil, observando una tendencia

creciente desde los últimos 5 años en ambos escenarios (Procolombia, 2020). Así las cosas, las exigencias de calidad que impone el mercado en la actualidad pueden ser una oportunidad para que el sector agrícola y la comercialización de frutos como la uchuva aumenten su auge y contribuyan al desarrollo económico y social del país, si estas se integran a sistemas de conservación y empaque eficientes que les permitan una vida útil considerable y un medio de presentación al consumidor amigable, sostenible y atractivo.

1.1 Empaques en alimentos

Inicialmente el empaque primario de los alimentos estaba orientado a las funciones básicas de contener y proteger. Sin embargo, con el pasar del tiempo sus objetivos se han ampliado y ahora es necesario que cumplan con una gran variedad de criterios fisicoquímicos y mecánicos encaminados a ampliar los periodos de vida útil. Por otro lado, estos deben ser prácticos, manipulables, eficientes, económicos y deben ajustarse al entorno y las cadenas logísticas que contemplan la disposición final (León, 2013). En el presente, el mercado dispone de una gran variedad de sistemas de empaque para matrices alimentarias que se han desarrollado teniendo en cuenta la naturaleza de cada producto y los requerimientos normativos de almacenamiento, distribución y transporte (Cámara de Comercio de Bogotá [CCB], 2019; Escobar, 2018; Procolombia, 2015). En términos globales, para el envasado de alimentos se han utilizado principalmente materiales como el vidrio, metal, madera, papel, cartón y plástico (Povea, 2019), destacándose la incorporación de este último y cuyo carácter sintético lo ha convertido en uno de los grandes desafíos en cuanto a residuos derivados de la cadena agroalimentaria a nivel mundial, ya que aunque se caracterizan por su bajo costo, versatilidad y variedad, son obtenidos a partir de recursos no renovables como el petróleo, poseen un único uso, migran con facilidad a diversos ecosistemas y su tasa de degradabilidad es muy lenta, impactando directamente y de manera importante la acumulación de residuos sólidos en el planeta (Montoya y Martínez, 2013).

1.2 Uso de plástico en empaques

Los plásticos sintéticos están elaborados con compuestos derivados del petróleo, el gas natural o el carbón y son producidos mediante polimerización, ya sea por adición, por condensación, o por etapas, creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas

(Garavito, 2007; Villalba, 2011). Estas estructuras pueden ser rígidas, semirrígidas o flexibles, característica que les permite abarcar una amplia gama de aplicaciones de empaque, desde contenedores de gran resistencia hasta películas maleables (Beltrán y Marcilla, 2011). Siendo así, la principal razón por la que su consumo es masivo y poco sostenible, teniendo en cuenta que el periodo de degradación bajo condiciones ambientales puede oscilar los mil años (Christoph *et al*., 2016; San Andrés *et al*., 2010).

1.3 Empaques ambientalmente sostenibles

El sector de empaques para alimentos está apuntando hacia la innovación y el desarrollo de tecnologías nuevas, basadas principalmente en estructuras poliméricas de origen natural con características biodegradables, que garanticen una huella ambiental baja o nula y que a la vez sean funcionales y seguras para los productos que van a contener y el consumidor (Navia y Villada, 2013). Un ejemplo de ello son los bioplásticos, que han surgido como alternativa a los plásticos sintéticos, estos se destacan por ser materiales biobasados, biodegradables, o que reúnen ambas características (Brown, 2013). De una manera más amplia son materiales cuya composición total puede estar dada por tres vías:

- materias primas de origen renovable y biodegradables
- materias primas de origen renovable pero no biodegradables
- materias primas de origen petroquímico y biodegradables

También pueden ser clasificados como materiales biobasados y biodegradables. Los biobasados son aquellos elaborados a partir de biomasa y/o de recursos naturales renovables que requieren de etapas de procesamiento químico antes de su utilización, uno de los procesos más comunes para su obtención es a partir de fermentación de almidones, que se transforman en monómeros que pueden ser polimerizados. Sin embargo, este tipo de materiales solo garantizan una huella de carbono más baja y un origen renovable, más no un carácter biodegradable, ya que esta característica depende netamente de la estructura química del polímero y no del proceso o la materia prima mediante la cual se produce (Vásquez *et al*., 2015).

Los empaques biodegradables se pueden manufacturar a partir de recursos renovables o de combustibles fósiles, siempre y cuando sean susceptibles a procesos de mineralización, donde

el polímero se convierte en compuestos más simples como energía, metano, agua, CO_2, materia inorgánica o biomasa por acción de microorganismos o enzimas (Ashter, 2016; Leja y Lewandowicz, 2010). Este proceso es favorable ya que induce una disposición final adecuada y compostable en múltiples ambientes como el suelo, cuerpos de agua, rellenos sanitarios y entornos de degradación anaerobia controlada (Philp *et al*., 2013).

Según el análisis del mercado realizado por EuropaBio en 2016, la industria de sustitutos biodegradables del plástico contribuye al crecimiento de la economía y abre un nuevo mercado de empleo, por ejemplo, en Europa se espera que para el 2030 se alcancen los 300.000 puestos de trabajo derivados de esta industria. Sin embargo, la producción de bioplásticos comparada con la de los otros tipos de plásticos, solo abarca el 1% de 320 millones de toneladas (Mozaffari *et al*., 2019) y sigue siendo una industria débil en países del tercer mundo. En Colombia se espera para el 2019 un consumo de envases plásticos de 32.000 millones de unidades, de los cuales aproximadamente el 62% se utilizan en la industria de alimentos, mostrando consistencia con el aumento de la oferta y demanda de productos procesados y envasados (Borja y Ramírez, 2016). En ese orden, la participación del mercado de materiales biodegradables podría tener una perspectiva positiva si parte del consumo plástico se sustituye por opciones sostenibles. Sin embargo, esta oportunidad depende directamente del aumento de la conciencia pública, la apertura a nuevas dinámicas mercantiles en el país y la inclusión y desarrollo de legislación y estándares para nuevas alternativas de empaque (Mozaffari *et al*., 2019).

1.4 Empaques para frutas

La variedad de empaques disponibles en material de tipo plástico y bioplástico es muy amplia. No obstante, la aplicación de cada uno de ellos depende directamente del alimento que se quiere envasar, las propiedades a conservar y el requerimiento técnico y logístico que implique (Illanes-Esparza, 2004). En el caso del empaque de frutas frescas, los empaques más comunes son películas, bolsas, bandejas, estuches y protectores flexibles (Procolombia, 2016), que cumplen los requisitos generales para los envases en contacto directo y dosificado, adicionalmente son transparentes, lo que permite que se aprecie visualmente la calidad del producto. Para este tipo de alimentos es imprescindible contar con el funcionamiento integrado de un sistema de ventilación o permeación de gases como el oxígeno, el etileno, el

dióxido de carbono y el vapor de agua, con el fin de que haya un intercambio eficiente con la atmosfera y se evite la acumulación de los resultantes de los procesos metabólicos del fruto al interior del empaque, los cuales pueden ocasionar rápidos procesos de degradación y contaminación (Hernández *et al*., 2010; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2007; Valle-Guadarrama *et al*., 2009) .

Los materiales más usados en el empaque de frutas son los plásticos de origen sintético, como los polímeros obtenidos a partir de monómeros vinílicos, que son pequeñas moléculas conteniendo dobles enlaces carbono-carbono (Gamboa, 2018). Una muestra de ellos son el polietileno, este se obtiene del monómero etileno, cuando se polimeriza sus moléculas se unen por medio de sus dobles enlaces, formando cadenas largas de varios átomos de carbono que contiene solo enlaces simples entre sí. También se tienen polímeros más complejos obtenidos a partir de monómeros en los cuales uno más grupos de hidrógenos del etileno son remplazados por otro átomo o grupo atómico, un ejemplo de estos son el polipropileno, poliestireno y el policloruro de vinilo (Billmeyer, 2004). Como se ha mencionado anteriormente, estos materiales presentan desventajas ambientales debido a la lenta degradabilidad que poseen.

En cuanto a los materiales biodegradables que han presentado mayor inclusión y desarrollo para el empaquetamiento de frutos se destacan el PLA (ácido poliláctico) y los polihidroxialcanoatos (PHA), el primero es obtenido por polimerización del ácido láctico procedente de la fermentación de biomasa (almidón de maíz, patata, caña de azúcar), se caracteriza por presentar dos enantiómeros (D y L) y la relación entre el contenido de ambos determina sus propiedades. En cuanto al PHA, este es un poliéster de reserva, producido por bacterias sometidas a condiciones de estrés, las cuales las sintetizan en varias formas químicas, con variabilidad de la posición de sus grupos funcionales, variedad de monómeros y de grados de polimerización, dando como resultado películas o contenedores obtenidos por extracción o inyección con diferentes puntos de fusión, cristalización, flexibilidad, resistencia y velocidades de degradación (Bernárdez, 2017; Endres, 2019).

Por otra parte, también se encuentra la celulosa reconocida por ser la materia prima fundamental para fabricar papel y cartón. Las fibras de celulosa son un constituyente esencial de los tejidos vegetales, cuya función es la de dar resistencia a los mismos. En algunos países

de América Latina se fabrica papel a partir de los residuos originados en la industria azucarera denominados "bagazo", que son una buena fuente de celulosa (CCB, 2019). Adicionalmente se han desarrollado materiales basados en celulosa modificada químicamente, como el acetato de celulosa. Este compuesto es empleado para hacer envoltorios para alimentos, ya que tiene buenas propiedades para hacer películas flexibles, resistentes a rupturas y perforaciones. Sin embargo, aun así, la capacidad de barrera a la humedad y a los gases es menor frente a los materiales plásticos (Comisión Intersectorial de Seguridad Alimentaria y Nutricional [CISAN], 2012; Mena *et al*., 2019).

1.5 Características de los materiales de empaque para frutas

Cada material de empaque tiene prestablecidas una serie de características que son relevantes al momento de envasar frutas, ya que influyen de manera directa sobre los procesos metabólicos que realizan los productos. Por ejemplo, la resistencia mecánica, el tamaño, la forma y la permeabilidad. Esta última dependerá de cómo este concebido el empaque ya que puede ocurre por fenómenos de transferencias a través del material, perforaciones o ventanas que permitan la circulación de gases (FAO, 1987; Moreno, 2005).

Resistencia mecánica. La resistencia de un empaque es el resultado directo de su tamaño, de su forma y de los materiales y técnicas usadas en su construcción. Indica la capacidad para soportar en condiciones variables de humedad, temperatura, apilamiento, almacenamiento y transporte sin que se presente colapso bajo cualquier circunstancia de manipulación y proceso de mercadeo (FAO, 1987; ICONTEC, 2007; Procolombia, 2016).

Tamaño y forma. De acuerdo con la rigidez y configuración del material se pueden obtener diferentes presentaciones de empaque en forma de películas, bolsas y contenedores. Sin embargo, siempre deben estar diseñados de manera tal que permitan un fácil manejo, pesos livianos a moderados y dimensiones y formas apropiadas que se adapten al embalaje secundario y terciario (Escobar, 2018; FAO, 1987).

Ventilación. La ventilación es indispensable para evitar la acumulación de los productos resultantes de los procesos metabólicos de las frutas como lo son gases, calor y agua en el

interior. Así como también, para permitir una adecuada refrigeración cuando esta es utilizada. Usualmente puede obtenerse por medio de perforaciones o ventanas, pero en el caso de un empaque diseñado como revestimiento o película se establecerá el intercambio de materia a través del material de acuerdo con su permeabilidad, sin que ello comprometa la resistencia y estabilidad (AKTIVA, 2015; FAO, 1987).

Permeabilidad. La permeabilidad es el proceso de transferencia de masa y/o energía en el cual se produce el paso de moléculas a través del material polimérico. En el caso de empaques destinados para alimentos los materiales deben cumplir con características básicas de transferencia de vapor de agua y de gases, que puede ocurrir por dos mecanismos de transferencia de masa: el fluido capilar y el de difusión activada; en el primer caso las moléculas pasan a través de un medio altamente poroso a diferencia de la difusión activada donde ocurre bajo un gradiente de concentración (Philp *et al*., 2013; Trejo *et al*., 2001).

La propiedad de permeabilidad en los materiales de empaque usados para frutas es vital, ya que de ello depende que el sistema actúe a favor de la conservación del producto, siempre y cuando se establezca un adecuado flujo de los gases y calor producto de los procesos de respiración y transpiración. Esta propiedad está sujeta a factores como la estructura química del polímero y el volumen libre, que es el espacio libre entre las moléculas que condiciona la absorción y difusión a través del material. El volumen está establecido por la densidad y las propiedades físicas del polímero. La cristalinidad también juega un papel importante sobre la permeabilidad, esta indica el grado de ordenamiento molecular que posee la estructura del empaque, cuando este factor tiende a aumentar ocasiona una disminución en la movilidad y capacidad de absorción. Finalmente, y no menos importante, la orientación molecular, hace referencia a la alteración mecánica y realineamiento de la estructura del material, dicha orientación define el aumento de cristalinidad y, en consecuencia, la disminución del volumen libre lo que puede traducirse en una mejora de las propiedades de barrera (McCranie *et al*., 2011; Philp *et al*., 2013).

La tabla 1. muestra los coeficientes de permeabilidad (cm^3 mm m^{-2} atm^{-1} d^{-1}) a 20 °C de los materiales de empaque más usados para el envasado de frutas, donde se puede evidenciar que la permeación al vapor de agua aumenta considerablemente para polímeros biodegradables como el PLA.

Tabla 1.1 Coeficientes de permeabilidad (cm^3 mm m^{-2} atm^{-1} d^{-1}) a 20°C de los materiales de empaque

Polímero	Q_{O2}	Q_{CO2}	Q_{N2}	Q_{H2O}^*
LDPE	190–200	1050–1250	100–150	5500–6000
HDPE	40–70	160–190	14–20	2100–2500
PP	80–95	250–280	17–25	4000–4200
OPP	40–50	180–200	10–15	1800–2200
PLA	60–80	150–190	20–30	300000–350000
EVA	300–330	1100–1300	120–150	10000–15000
PA	1–5	3–10	0.3–1	20000–30000

Adaptado de: Castellanos y Herrera (2017).

1.6 Sistemas cerrados de empaque

Los sistemas cerrados de empaque dependen directamente de los mecanismos de transferencia de masa, un ejemplo de ello son los empaques con tapa y fondo, conformados en forma de almeja o bandejas termo selladas con películas. Estos son empaques que poseen gran popularidad por su versatilidad, la protección óptima que otorgan al producto y su agradable presentación. Son empleados en productos de alto valor comercial, como algunas frutas pequeñas, bayas y setas debido al alto riesgo de daño por aplastamiento (León, 2013; Radoselovics-Lahoz, 2016), adicionalmente esta forma de empaque permite el control o modificación de atmosferas.

Control de atmosferas. La conservación consiste en la regulación de las variables físicas del ambiente como la temperatura, la humedad y la circulación del aire que mantiene constante la concentración de gases. Usualmente el control también se entiende como una atmósfera empobrecida en oxígeno (O_2) y enriquecida en dióxido carbónico (CO_2). Para la conservación de productos hortofrutícolas, la composición del aire se ajusta de forma precisa a los requerimientos del producto envasado, manteniéndolos inalterables durante todo el proceso (Pinto *et al*., 2016).

Modificación de atmosferas. La composición del aire no es constante a través del tiempo, la estructura del material finalmente es la que permite el intercambio de gases entre el espacio de cabeza del empaque y la atmósfera exterior y gracias a ello se obtienen estados de equilibrio entre los gases consumidos y producidos por el alimento y los que se intercambian a través del material de envasado (Paine y Paine, 2009). El proceso de equilibrio estará dado por la permeabilidad de las películas frente a los gases (O_2, CO_2, H_2O), provenientes de la respiración y transpiración de la matriz contenida. Así las cosas, dependerá directamente de la capacidad de transferencia del material usado, por tanto, cada tipo de empaque otorgará una evolución diferente a los frutos (Ospina *et al*., 2008; Pinto *et al*., 2016; Soleno-Wilches, 2017).

La modificación de atmosferas sobre los alimentos y en especial en las matrices vivas como frutas y verduras, disminuye la velocidad de respiración y provoca un retardo en el tiempo de pérdida de calidad y degradación, esto permite mantener los productos durante un periodo de tiempo más largo, siendo de vital importancia cuando se desea exportar un alimento o almacenarlo en cantidades considerables (Vol *et al*., 2017). Hay muchos materiales de tipo plástico disponibles para utilizarlos en los procesos de envasado de frutas, pero relativamente pocos son de carácter biodegradable, debido a que la aplicación de atmosferas modificadas requiere coeficientes de permeabilidad adecuados y estables, los cuales no han sido probados a cabalidad (Philp *et al*., 2013). Cuando no se logra el equilibrio gaseoso se presentan relaciones de CO_2 y O_2 perjudiciales para la mayoría de las frutas y hortalizas. Generalmente, este tipo de matrices requieren que la película permita una mayor proporción de salida de CO_2 que la de O_2 entrante; es decir que la permeabilidad del CO_2 debe ser entre 3 y 5 veces mayor a la permeabilidad del O_2, dependiendo esta relación directamente de la atmósfera que se desea obtener y de la naturaleza del tipo de producto que se desea empacar (Caleb *et al*., 2012)

Propiedades físicas. Tal como se mencionó anteriormente, además de la propiedad de permeabilidad, los materiales de empaque para el envasado de matrices vivas también deben tener en cuenta factores físicos, como la suficiente fuerza para resistir la punción, soportar las flexiones sucesivas, y tolerar las tensiones mecánicas sufridas durante la manipulación. De igual forma, deben tener buenas propiedades de tipo mecánico, como la dilatabilidad, resistencia a rotura, al arranque y la adherencia entre las distintas capas. Si el conjunto de estas

propiedades es débil, se tendrán daños prematuros o inesperados del material de empaque y en consecuencia la pérdida de las condiciones de atmosfera modificada y calidad el producto (Gould, 1996, 2000; Ooraikul, 2002).

Propiedades ópticas. Los materiales de empaque para frutas y hortalizas también están condicionados por otro tipo de propiedades, como las ópticas, dentro de las que se destacan la opacidad y la transparencia. Estos son factores influyentes en la conservación de la calidad de los productos, ya que algunos rayos luminosos estimulan los cambios fisicoquímicos en los alimentos. En la mayoría de los casos, los productos envasados en atmosfera modificada requieren un empaque transparente, de modo que el estado del producto sea visible. Sin embargo, en algunos casos, como el de las frutas, al ser almacenadas a bajas temperaturas tienen la tendencia a formar un velo en el interior del empaque, debido a su alto contenido de humedad y la velocidad de liberación de vapor de agua, ocasionando un oscurecimiento del empaque del producto. Por ello, muchas películas disponibles para el empaque son tratadas con un recubrimiento o aditivo para proporcionarle propiedades antiempañantes o "antivaho" para mejorar la visibilidad (FAO, 1987; Ospina *et al*., 2008; Villada *et al*., 2007)

1.7 Empaque para frutos de Uchuva

La uchuva es una baya globosa de 1,25 - 2,50 cm de diámetro y peso entre 4 - 10 g (Zamorano *et al*., 2002), se caracteriza por un alto contenido de vitaminas, minerales y fibra, adicionalmente es un producto altamente perecedero con comportamiento mayoritariamente climatérico que durante la maduración cambia de color verde a naranja e incrementa el contenido de azúcares solubles, principalmente sacarosa, su actividad antioxidante aumenta y se manifiesta el aroma característico del fruto compuesto principalmente por hidroxiésteres (Balaguera-López *et al*., 2016; Lanchero, Velandia, Fischer, y Varela, 2007).

De acuerdo con la NTC 4580 (ICONTEC –, 1999), el estado de madurez del fruto se aprecia visualmente en los cambios de color externos del cáliz (Figura 1.1) y se puede confirmar por medio de pruebas fisicoquímicas.

La presentación del producto depende directamente del mercado y de las exigencias del consumidor, en el mercado nacional se destaca el uso de empaques plásticos perforados con

capacidad entre 250 a 450 g y de canastillas plásticas de fondo liso con una capacidad de aproximadamente 6 kg (Figura1.2). Para el mercado de exportación el producto debe dosificarse en empaques perforados con la misma capacidad que para el mercado nacional (250g a 450g) y con un soporte secundario generalmente de cartón (Castiblanco, 2018; García *et al*., 2014; ICONTEC, 1999).

Figura 1.1 Tabla de color de la uchuva
Fuente: Autor

Figura 1.2 Empaque para mercado nacional (izquierda) y de exportación (derecha).
Fuente: ICONTEC (1999)

Las uchuvas, son un fruto apto para los sistemas de empaque cerrados, ya que al ser bayas casi redondas de un diámetro pequeño requieren de métodos envasado dosificado, que sirva como medio de contención y protección. Estos frutos representan un desafío de conservación ya que también han sido clasificados en un intermedio entre climatérico y no climatérico, debido a que su velocidad máxima de respiración no coincide con la mejor relación de madurez (Pinzón *et al*., 2015). Adicionalmente, los frutos de uchuva tienen un alto valor sensorial que se distingue por su naturaleza ácida y un alto contenido de vitamina C, actualmente posee una alta demanda en los mercados estadounidenses y europeos debido a su sabor, color y forma (ANALDEX, 2020; ANALDEX, 2018), lo que le otorga un gran potencial para incursionar en nuevos mercados (Mendoza y Rodriguez, 2012) y justificar los costos derivados de sistemas de empaque más robustos y prominentes (Procolombia, 2015).

Estas bayas tienen un carácter diferenciador ya que es una de las pocas especies que se forman y permanecen dentro del cáliz durante todo su desarrollo (Fischer *et al*., 2014). El cáliz es acrescente, tiene forma de vejiga y es un globoso-ovoide que tiene dimensiones entre 2.5 a 4 cm de largo por 2-3 cm de ancho. El cáliz es un indicador de madurez ya que usualmente presenta sincronía en el cambio de color del fruto de verde a amarillo-naranja (Morillo; Villota; Lagos y Ordóñez , 2011).

Cáliz de la uchuva. La comercialización en Colombia y en Estados Unidos se prefiere sin cáliz, mientras que países como Europa y Canadá optan por la presencia de esta parte del fruto. Aun así, se ha evidenciado que el cáliz no aporta mayor valor agregado, ni cumple con los requisitos logísticos para facilitar el transporte, manipulación, conteo y exhibición (García M. *et al*., 2014). Sin embargo, un estudio realizado por Balaguera López *et al*., (2015) evidenció que la presencia del cáliz en la fisiología poscosecha del fruto disminuye la producción de etileno en comparación con frutos sin cáliz y en consecuencia se presentan menores perdidas de peso y firmeza, con valores de acidez titulable más bajos. Debido a estas variables de presentación, es necesario establecer métodos de empaque que optimicen las condiciones de almacenamiento y comercialización, sin sacrificar la calidad o vida útil del producto. El uso de atmosferas es una técnica física viable, ya que no deja residuos químicos, y que, acompañada de un adecuado manejo de la temperatura y la humedad relativa, puede controlar la velocidad de transpiración y respiración, ralentizando las velocidades de degradación y conservando el producto por más tiempo (Lanchero *et al*., 2007; Pinto *et al*., 2016) .

Actualmente existen algunos estudios respecto al uso de sistemas de empaques con modificación de atmosfera para la preservación de frutos como la uchuva, sin embargo, estos no contemplan el uso de materiales biodegradables alternativos a los plásticos convencionales. Por ejemplo, uno de los primero estudios en Colombia fue realizado por Mejía (1997) quien evaluó los frutos de uchuva al ser empacados en materiales sintéticos como etilvinil alcohol (EVOH), Poliéster/Polietileno, Cryovac®, Polyvac aluminizada, polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE) en presencia de atmosferas modificadas, encontrando que el empaque poliéster/polietileno resultó ser el más apropiado por presentar alta barrera a la entrada de oxígeno, ser el de menor abombamiento y mostrar la menor

condensación de agua. Adicionalmente estableció que, en comparación, los tratamientos en condiciones de atmosfera modificada conservaban la uchuva tanto con y sin cáliz por un período superior siempre y cuando estuviesen bajo condiciones de refrigeración. Posteriormente, Lanchero *et al*., (2007) evaluaron frutos con y sin cáliz, empacados en películas de polietilentereftalato-polietileno, polipropileno biorientado-polietileno y polyolefin, bajo cuatro concentraciones diferentes de gas, encontrando que estas últimas no generaban diferencias significativas, pero que la película de polyolefin mostraba el mejor comportamiento sobre el índice de madurez, pH y perdidas de peso del fruto. Adicionalmente encontraron que los productos almacenados en empaque plástico y atmósfera modificada perdieron en promedio 0,48% del peso, frente a los no empacados que presentaron una pérdida del 4,6%. La combinación de tecnologías emergentes también se ha probado a la par con la modificación de atmosfera en uchuvas, Moreno-Guerrero *et al*., (2012), realizaron una investigación empleando como material de empaque polietileno de baja densidad, temperatura de refrigeración de 5 °C y dos diferentes dosis de radiación, encontrando que el uso combinado de la radiación y el empaque en atmósfera modificada reduce la pérdida de peso e índice de daño y produce solo ligeros cambios en los parámetros de color del fruto, permitiendo incrementar la vida útil de la uchuva hasta 35 días.

Por otra parte, se encuentra que el método de conservación más utilizado esta únicamente en función de la temperatura de almacenamiento y el control de la humedad relativa (Procolombia, 2015). Estudios como los realizados por Bohdziewicz y Czachor, (2016) y Pinzón *et al*., (2015), muestran que para este fruto las temperaturas de refrigeración son favorables y tienden a disminuir la velocidad metabólica y extender los periodos de vida útil, en comparación con temperaturas ambientales estándar. Sin embargo, aunque es un tratamiento de bajo costo, este no garantiza la protección integral ni la estabilidad metabólica de los frutos, teniendo como consecuencia grandes pérdidas, y barreras de comercialización.

La era actual de consumidores gira en torno a la necesidad de practicidad, esta puede verse en diferentes aspectos del producto y su empaque ajustado a las necesidades y exigencias, como la facilidad, el consumo directo e inmediato, convirtiendo así esta característica en un criterio que propicia el consumo desmedido de empaques que son generalmente de tipo plástico, ya que es percibido como pulcro e inocuo desde la mirada aparentemente “eficientista” del comprador actual, quien quiere desempeñar labores que impliquen menor gasto de tiempo

para alimentarse, otorgándole mayor valor a los productos creados por la industria que a los creados por la naturaleza como lo son las cáscaras (Martinez, 2016). Sin embargo, se debe tener en cuenta que la necesidad de conservar productos alimenticios y satisfacer la necesidad de los consumidores, no puede ir en contravía de la naturaleza y las adaptaciones normativas ambientales de cada país, teniendo en cuenta que a nivel global y sobre todo en los países desarrollados aumenta la tendencia a la prohibición de los polímeros plásticos destinados a empaques de un solo uso (Téllez, 2012), razón por la cual es necesario evaluar el uso de materiales biodegradables con el fin de disminuir la cantidad de pérdida de productos perecederos, sin comprometer el ambiente y sin contribuir a la generación de desechos sólidos insostenibles (Marin y Escobar, 2017). En ese sentido, los fabricantes de envases están cada vez más interesados en buscar el menor impacto ambiental durante todo el ciclo de vida. Esta tendencia influirá en todos los ámbitos de la fabricación de empaques: desde su diseño hasta su valorización (Böhm Silveti, 2015) haciendo de la producción de materiales biodegradables una opción promisoria para conseguir ahorros de energía y grandes beneficios medioambientales (Marin y Escobar, 2017).

Referencias

Aktiva. (2015). El procesamiento y conservación de frutas en Colombia. Estudios Sectoriales. Servicios Financieros

Asociación Nacional de Exportadores [ANALDEX]. (2020). ¡Uchuva / Goldenberry nuestra Embajadora de frutas colombianas para el mundo!

Asociación Nacional de Exportadores [ANALDEX]. (2018). Comportamiento de la uchuva – Producción y comercio.

Ashter, S. A. (2016). Overview of biodegradable polymers. In Introduction to Bioplastics Engineering (pp. 19–30). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39396-6.00002-6

Balaguera-López, H. E., Martínez-Cárdenas, C. A., & Herrera-Arévalo, A. (2016). Comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.): Efecto de diferentes dosis y tiempos de exposición al 1-metilciclopropeno. Bioagro, 28(1), 21–28.

Balaguera López, H. E., Martínez C., C. A., & Herrera Arévalo, A. (2015). Papel del cáliz en el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 8 (2), 181. https://doi.org/10.17584/rcch.2014v8i2.3212

Beltrán, M., & Marcilla, A. (2011). Tipos de plásticos, aditivación y mezclado. In Tecnología de polímeros.

Bernárdez, P. F. (2017). Biopolímeros en la industria alimentaria Situación actual Tendencias actuales en envasado.

Billmeyer, F. W. (2004). Ciencia de los Polímeros.

Bohdziewicz, J., & Czachor, G. (2016). Changes of Mechanical Properties of Kumquat (Citrus Japonica Thunb.) and Cape Gooseberry (*Physalis Peruviana* L.) Fruits During Storage. Agricultural Engineering, 20(3), 15–25. https://doi.org/10.1515/agriceng-2016-0040

Böhm Silveti, E. (2015). Diseño de "packaging" ecológico para "cosecha; frutas y verduras en polvo soluble", como un factor en la decisión de compra de los consumidores de estrato 2 y 3 de la ciudad de Bogotá. Safety Science, 33(3), 1–6. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04.023

Borja M., M., & Ramírez Domiciana, N. (2016). Plan de negocio Thermoplastic S.A.S. (Vol. 3, Issue 1). https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000238666

Brown, D. D. (2013). Frequently asked questions on bioplastics. In Agile User Experience Design (pp. 147–161). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415953-2.00005-4

Caleb, O. J., Opara, U. L., & Witthuhn, C. R. (2012). Modified Atmosphere Packaging of Pomegranate Fruit and Arils: A Review. In Food and Bioprocess Technology. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0525-7

Castellanos, D. A., & Herrera, A. O. (2017). Modified Atmosphere Packaging: Design and Optimization Strategies for Fresh Produce. In Postharvest Handling. InTech. https://doi.org/10.5772/intechopen.68498

Castiblanco, C. (2018). Mercado de la Uchuva. Asociación Nacional de Comercio Exterior. https://www.analdex.org/2018/02/26/mercado-de-la-uchuva/

Cámara de Comercio de Bogotá [CCB]. (2019). Guía práctica sistema de empaque, envase, embalaje y etiquetas.

Christoph, R., Christoph, R., Muñoz, R., Hernández, Á., & Ventura, J. (2016). Aspectos nano de los desechos de plástico. Momento- Revista de Física.

Comisión Intersectorial de Seguridad Alimentaria y Nutricional [CISAN]. (2012). Los plásticos biodegradables en la industria alimentaria. 1–2. http://cisan.org.ar/adjuntos/20110210125752_.pdf

Del Greco, N. I. (2010). Estudio sobre tendencias de consumo de alimentos. Datos relevantes para la toma de decisiones en la Agroindustria de Alimentos y Bebidas. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Argentina.

Endres, H. J. (2019). Bioplastics. In Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology. https://doi.org/10.1007/10_2016_75

Escobar Salcedo, J. E. (2018). El empaque en los alimentos. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales. https://doi.org/https://doi.org/10.23850/issn.2422-0582.

Fischer, G., Almanza-Merchán, P. J., & Miranda, D. (2014). Importancia y cultivo de la uchuva (Physalis peruviana L.). Revista Brasileira de Fruticultura, 36(1), 01–15. https://doi.org/10.1590/0100-2945-441/13

Gamboa Suárez, A. (2018). Polímeros. Educación Química. https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.1995.2.66717

Garavito, J. (2007). Plásticos.

García M., M. C., Peña, A. C., & Brito Grandes, B. (2014). Desarrollo tecnológico para el fortalecimiento del manejo poscosecha de la uchuva (*Physalis peruviana* L*.).* http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/3275

Gould, G. W. (1996). Methods for preservation and extension of shelf life. International Journal of Food Microbiology. https://doi.org/10.1016/0168-1605(96)01133-6

Gould, G. W. (2000). Preservation: Past, present, and future. In British Medical Bulletin. https://doi.org/10.1258/0007142001902996

Hernández, M., Barrera, J., & Melgarejo, L. (2010). Fisiología poscosecha. Experimentos en Fisiología Vegetal.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2007). Empaque y embalaje de frutas, verduras y tubérculos frescos. NTC 5422 (Issue 571, p. 5).

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (1999). NTC 4580:1999 Frutas frescas. uchuva. especificaciones. (pp. 1–14).

Illanes Esparza, J. F. (2004). Envases flexibles plásticos: uso y aplicación en la industria alimentaria. (Vol. 6, Issue 2). Universidad Astral de Chile.

Lanchero, O., Velandia, G., Fischer, G., Varela, N. C., & García, H. (2007). Comportamiento de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en poscosecha bajo condiciones de atmósfera modificada activa. Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8(1), 61. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:84

Leja, K., & Lewandowicz, G. (2010). Polymer biodegradation and biodegradable polymers - A review. Polish Journal of Environmental Studies.

León Cárdenas, J. F. (2013). Envases, Empaques y Embalajes. 35. https://licenciadofelipeleon.files.wordpress.com/2012/06/envases-2013-material.pdf

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2018). Balance Del Sector Hortifruticultura. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 11(3), 287–301

Marín I.D y Escobar J.O. (2017). Investigación de mercado nivel de aceptación productos desechables con material biodegradable en la industria de alimentos.

Martinez Reyes, M. C. (2016). La problemática de la cultura del empaque: del diseño centrado en el consumo, al diseño centrado en la función ambiental. Universidad Nacional de Colombia. p185. http://www.bdigital.unal.edu.co/55536/

McCranie, K. D., Faulkner, M., French, D., Daddis, G. A., Gow, J., & Long, A. (2011). Book Reviews. Journal of Strategic Studies. https://doi.org/10.1080/01402390.2011.569130

Mejía, M., B. (1997). Conservación de uchuva *(Physalis peruviana* L). en atmósferas modificadas. Universidad Nacional de Colombia.

Mena, M., Hernández, A., León, E. B., Cruz, R. G., Rayas, A., Díaz, M., Jiménez, J., Miranda, G., García, M., & López, C. (2019). Biopolímeros de celulosa en empaques alimenticios: Retos y aplicaciones. Agro-productividad, 12(11), 83–88. https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1499

Mendoza, H., & Rodriguez, A. (2012). Caracterización fisicoquímica de la uchuva (*physalis peruviana*) en la región de Silvia Cauca. Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial, 10(2), 188–196.

Montoya Rodríguez, C., & Martínez, P. (2013a). Diagnose of the current solid waste management (packages) in Universidad El Bosque. Producción + Limpia, 8(1), 80–90. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552013000100006&lng=en&nrm=iso&tlng=

Moreno Guerrero, C., Andrade Cuvi, M. J., & Concellón, A. (2012). Efecto del uso combinado de la radiación UV-C y atmósfera modificada sobre el tiempo de vida útil de uvilla (*Physalis peruviana* l.) Orgánica. Tsafiqui, 3, 43. https://doi.org/10.29019/tsafiqui.v0i3.220

Moreno, L. (2005). Manual técnico de frutas y verduras. ABC de Las Frutas y Verduras.

Morillo Paz, A., & Villota Cerón, D., & Lagos Burbano, T., & Ordóñez Jurado, H. (2011). Caracterización Morfológica y Molecular de 18 Introducciones de Uchuva *Physalis peruviana* L. de la Colección de la Universidad de Nariño. Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín, 64(2). http://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=179922664002

Mozaffari, N., Kholdebarin, A., & Mozaffari, N. (2019). A review: investigation of plastics effect on the environment, bioplastic global market share and its future perspectives. https://doi.org/10.5281/ZENODO.2600664

Navia, D. P., & Villada, C. S. (2013). Empaques biodegradables en ciencia, Impact of Biodegradable Packaging Research in Science, Technology and Innovation Pesquisa De Ciencia, Tecnología E. 11(2), 173–181. Ooraikul, B. (2002). Minimally processed

refrigerated fruits and vegetables. Trends in Food Science & Technology. https://doi.org/10.1016/s0924-2244(00)88965-7

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (1987). Manual para el mejoramiento del manejo poscosecha de frutas y hortalizas, Parte 1.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2014). Perspectivas por sectores principales. Agricultura Mundial: Hacia Los Años 2015/2030. Informe Resumido, 32–74.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017). Perspectivas mundiales de las principales frutas tropicales.

Ospina, S., & Cartagena, J. R. (2008). La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos. Revista Lasallista de investigación., 5(2), 112–124.

Paine, F. A. &, Paine, H. (2009). Empaque de Atmósfera Modificada. Empaques al día.

Philp, J. C., Bartsev, A., Ritchie, R. J., Baucher, M. A., & Guy, K. (2013). Bioplastics science from a policy vantage point. New Biotechnology. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2012.11.021

Pinto, N., De la Vegaa, J. C., & Cañarejo, M. (2016). Utilización del método de conservación bajo atmósferas controladas en frutas y hortalizas. Agroindustrial Science, 5(1), 127–132. https://doi.org/10.17268/agroind.science.2015.02.04

Pinzón, E. H., Reyes, A. J., Álvarez-Herrera, J. G., Leguizamo, M. F., & Joya, J. G. (2015). Comportamiento del fruto de uchuva *Physalis peruviana* L., bajo diferentes temperaturas de almacenamiento. Revista de Ciencias Agrícolas, 32(2), 26. https://doi.org/10.22267/rcia.153202.10

Povea, I. (2019). El envase como protector de los atributos de calidad de alimentos. Revista Alimentos Hoy, Vol. 27, No (47), 18–28. https://acta.org.co/acta_sites/alimentoshoy/index.php/hoy/article/view/525

Procolombia. (2015). Logística de perecederos y cadena de frío en Colombia. Cartilla Cadena de Frío, 112.

Procolombia. (2016). Manual del empaque y embalaje para exportación (p. 54).

Procolombia. (2020). Ficha técnica uchuva. https://docs.procolombia.co/int-procolombia/es/exportaciones/ficha_uchuva_final.pdf

Procolombia. (2019). Frutas y vegetales | Invierta en Colombia. https://investincolombia.com.co/es/sectores/agroindustria-y-produccion-de-alimentos/frutas-y-verduras

Radoselovics Lahoz, Á. (2016). Caracterización de las propiedades térmicas y dieléctricas de composites de celulosa bacteriana/carboximetilcelulosa/óxido de grafeno oxidado. https://riunet.upv.es:443/handle/10251/68547

San Andrés, M., Chercoles, R., De la Roja, J. M., & Gómez, M. (2010). Factores responsables de la degradación química de los polímeros.

Soleno-Wilches, R. (2017). Tecnologías no térmicas en el procesado y conservación de alimentos vegetales. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales. https://doi.org/10.23850/24220582.172

Téllez, A. (2012). La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá.

Trejo, V., Aragón, N., & Miranda, P. (2001). Estimación de la permeabilidad al vapor de agua en películas a base de quitosán. Revista de La Sociedad Química de México, 45(1), 1–5. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932001000100001

Valle-Guadarrama, S., Gómez-Cruz, A., Cruz-Cruz, F., & Chan-Chi, A. (2009). Modelado de una atmósfera modificada para conservar frutos de tomate de cáscara (*physalis ixocarpa*). Ingeniería Agrícola y Biosistemas, 1(1), 33–38.

Vásquez, A., Valdemar, R. M. E., Villavicencio, M. B., & Pérez, M. V. (2015). Bioplásticos y plásticos degradables. Asociación Nacional de Industrias Del Plástico A.C, 11.

Villada, H. S., Acosta, H., & Velasco, R. (2007). Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables. Temas Agrarios, 12(2), 5. https://doi.org/10.21897/rta.v12i2.652

Villalba, H. (2011). Plásticos. E.O.S.

Vol, I., De, J. C., Ca, M. A., Agropecuarias, C. (2017). Avances en Tecnología de Atmósferas Controladas y sus Aplicaciones en la Industria. Una Revisión. 28, 75–86. https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300009

Zamorano, E. L., Pablo, J., & Sánchez, S. (2002). Estudios fenológicos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) en El Zamorano. Trabajo Pregrado - Ciencia y Producción Agropecuaria.

Capítulo 2. Un modelo matemático combinado para representar la transpiración, la respiración y los cambios en la actividad del agua en frutas frescas de uchuva *(Physalis peruviana* L.*).*

Resumen

En este trabajo se propone un modelo combinado de respiración y transpiración para frutos frescos de uchuva considerando los cambios en la actividad del agua (a_w) y la humedad. Inicialmente, se obtuvo una correlación de parámetros a partir de datos experimentales para determinar la cinética del consumo de O_2 y la producción de CO_2 para los frutos a diferentes temperaturas. A partir de los datos sobre el cambio en la concentración de gas, se realizó un ajuste de parámetros evaluando tres modelos cinéticos para representar la respiración: 1) Modelo cinético de ley de potencias (LP), 2) Modelo simple de Michaelis-Menten (MM) y 3) Michaelis-Menten con inhibición no competitiva por CO_2 (MMA). La dependencia de la temperatura se consideró en los tres modelos mediante la integración de la ecuación de Arrhenius en los parámetros cinéticos. En consecuencia, se obtuvo un modelo combinado para describir la transpiración del fruto acoplando la isoterma de sorción de humedad (modelo logístico), e integrando la dependencia de la temperatura y la cinética respiratoria más adecuada. Se determinó que con la cinética MMA fue posible obtener un alto grado de ajuste con el comportamiento experimental para los cambios en las concentraciones de O_2 y CO_2 (R^2adj. = 0,964 y 0,981). La cinética de MM tuvo un ajuste aceptable (R^2adj. = 0,940 y 0,941), mientras que el modelo LP no pudo explicar el comportamiento observado (R^2adj. = 0,247 y 0,647). Se encontró que un modelo logístico describía adecuadamente la relación entre la humedad del fruto y la a_w (R^2adj. = 0,998). Se determinó una estrecha relación entre la transpiración del fruto y su tasa de respiración, el cambio en la actividad del agua y la temperatura y humedad relativa circundante (R^2adj. = 0,999). A medida que disminuía la

temperatura y aumentaba la humedad relativa, el cambio en la actividad del agua y la tasa de transpiración disminuían. A través de los parámetros establecidos para cada modelo es posible predecir el comportamiento de procesos como respiración, transpiración y cambios en a_w para configurar un sistema de almacenamiento y envasado proponiendo las ecuaciones de balance de gases (O_2, CO_2 y vapor de agua) que permiten obtener niveles de gases favorables para la conservación de las uchuvas frescas.

2.1 Introducción

El crecimiento del mercado nacional e internacional de los frutos de uchuva en los últimos años (Analdex, 2020; Procolombia, 2020) ha originado una serie de necesidades dentro de la cadena de producción y comercialización, dentro de las que se destacan la falta de sistemas eficientes para la conservación durante la poscosecha (Olarte y Suarez, 2019). Una respuesta a esta problemática es el uso de empaques activos y con atmósferas modificadas, que se ha constituido como una tecnología que puede alargar la vida útil de los productos agrícolas y a su vez mantener sus propiedades de calidad al establecer niveles favorables de gases para la preservación del producto empacado (Mangaraj *et al.,* 2015; Sandhya, 2010). Esta metodología de almacenamiento no es tan intensiva en energía y recursos porque permite de manera flexible la configuración del sistema de empaque que más le convenga al producto de interés a las condiciones externas de almacenamiento que se tengan (Castellanos *et al.,* 2016a; Mahajan *et al.,* 2007). Sin embargo, para usar de manera efectiva los sistemas de empaques activos, es necesario saber cómo se relaciona el metabolismo del producto empacado y el crecimiento de microorganismos, con los niveles de gases y la temperatura en el interior del empaque (Castellanos *et al.,* 2016b). Así mismo, se requiere la evaluación y el desarrollo de materiales avanzados con características especiales que permitan la configuración eficiente del empaque para obtener los niveles de gases estables más favorables para la mayor preservación del producto y la solución de los problemas más relevantes que causan el deterioro.

Los frutos de uchuva se caracterizan por un comportamiento respiratorio con tendencia climatérica, ya que luego de la madurez fisiológica presentan un aumento de la tasa respiratoria y producción auto catalítica de etileno, este fenómeno da lugar a cambios fisiológicos como el desarrollo de características organolépticas agradables ligadas a la disminución de contenidos de almidón, ácidos orgánicos y el aumento de la concentración de

azúcares solubles (Balaguera-López *et al.*, 2016; Guevara-Collazos *et al.*, 2019; Olivares-Tenorio *et al.*, 2017). Dadas sus características, su índole perecedera y los múltiples factores que ocasionan su deterioro, es necesario encontrar condiciones adecuadas de manipulación y distribución durante la poscosecha, que contribuyan a mejorar la comercialización y reducir las pérdidas (González-Locarno *et al.*, 2020; Guevara-Collazos *et al.*, 2018; Lanchero *et al.*, 2007). Estos productos como cualquier fruto fresco poseen un comportamiento metabólico basado en el intercambio gaseoso (O_2, CO_2, vapor de agua) con la atmosfera, que ocurren a través de procesos de respiración y transpiración, los cuales son determinantes en la velocidad de degradación del producto (Balaguera-López *et al.*, 2015; Fischer y Melgarejo, 2020). Al establecer la cinética del consumo de O_2 y producción de CO_2 (respiración) y vapor de agua (transpiración) en función de variables extrínsecas como la temperatura y la concentración de gases en la atmósfera, es posible configurar condiciones de almacenamiento favorables para la preservación del producto, que ralenticen dichas dinámicas metabólicas y extiendan la vida útil del fruto (Castellanos y Herrera, 2017; Jalali *et al*., 2020; Lufu, Ambaw y Opara, 2019). Lo anterior generalmente mediante del uso de empaques que permiten la modificación de atmosferas (MAP) y condiciones específicas de temperatura y humedad relativa durante el almacenamiento (Agudelo-Rodríguez *et al.,* 2020; Castellanos *et al.*, 2016).

Algunos estudios han desarrollado modelos cinéticos de transpiración y respiración con dependencia de las concentraciones de gas y temperatura para frutos frescos como bananas (Ghosh y Dash, 2018), fresas (Jalali *et al.*, 2020; Bovi *et al.*, 2016) y pitayas (Ho *et al.*, 2020), en los cuales se ha encontrado una aplicación potencial para la selección de estrategias óptimas de control de la humedad, selección y diseño de materiales de embalaje adecuados. Para algunos casos específicos, la respiración y la cinética de transpiración también se han combinado en un solo modelo (Bovi *et al.*, 2018; Castellanos *et al.*, 2016; Gómez *et al.*, 2019) obteniendo resultados útiles para estimar los cambios de O_2, CO_2, y vapor de agua simultáneamente en el espacio de la cabeza del embalaje. Sin embargo, en el caso de frutas como la uchuva, la información disponible es escasa; por lo tanto, la construcción de modelos matemáticos para este tipo de bayas resulta importantes y contribuyen a la mejora de los sistemas de empaque y las cadenas logísticas de la fruta fresca.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue obtener un modelo combinado para describir la transpiración y respiración de frutos de uchuva en estados de madurez comercial incluyendo

la interacción entre estos procesos metabólicos y la isoterma de sorción del producto, considerando variaciones externas en la temperatura y la humedad relativa. El modelo fue desarrollado para definir de antemano (a través de la simulación) las condiciones de almacenamiento y envasado que conducen a regular eficazmente el transporte de gases y vapor de agua hacia y desde la fruta y a partir de esto reducir la pérdida de humedad y el deterioro.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Frutos de uchuva

Los frutos de uchuva se obtuvieron de productores locales ubicados en el municipio de Ventaquemada Boyacá (Colombia). Los frutos se cosecharon en la etapa de madurez fisiológica y luego se transportaron al laboratorio de poscosecha, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá, Colombia; P = 74,660 kPa). Inicialmente el cáliz de todas las muestras fue retirado y se seleccionaron frutos de maduración intermedia (etapas 3/4 de 6 correspondientes a frutos de color naranja claro homogéneo con un aspecto fresco y consistencia firme), sin evidencia visible de daños, decaimiento microbiano o cualquier deterioro. Se seleccionaron de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 4580 (ICONTEC, 1999). Posteriormente se realizó limpieza y desinfección utilizando una solución de hipoclorito sódico de 100 mg kg^{-1} durante 60 s. Por último, las muestras se dejaron secar durante 2 horas a 17 °C para eliminar el agua superficial y se prepararon para la evaluación experimental de la respiración, la transpiración y la actividad de agua.

2.2.2 Determinación experimental de la velocidad de respiración

La determinación experimental de la respiración en los frutos se llevó a cabo a diferentes temperaturas utilizando el método de sistema cerrado de acuerdo con la metodología propuesta por Gómez, Castellanos y Herrera (2019) y Mendoza *et al*. (2016). Las muestras con un peso total de 0,102 ± 0,001 kg (aprox. 11-12 frutas) fueron tomadas y colocadas en recipientes de vidrio sellados herméticamente con un espacio en la cabeza de 356 ± 5,621 cm3. Los contenedores fueron almacenados en una cámara climática C240 (Insak SAS, Bogotá, Colombia) a 5.5 °C, 9.9 °C, 17.1 °C y 25.6 °C ± 0.5 °C. Antes del inicio de la prueba, los recipientes

se dejaron abiertos a la temperatura de prueba durante 2 h para permitir que la fruta se aclimatase. Una vez iniciada la prueba, los contenedores fueron sellados herméticamente y las concentraciones de O_2 y CO_2 en el espacio de la cabeza se midieron en diferentes momentos tomando una muestra de gas de 5 cm^3 a través de un sello de goma situado en la parte superior del contenedor mediante el uso de un analizador electrónico Dansensor CheckPoint 3® (Mocon Inc., Minneapolis, MN, EE. UU.). Las mediciones fueron realizadas hasta obtener una concentración O_2 por encima del 2% con el fin de no inducir procesos de respiración anaeróbica en la prueba. Todas las pruebas bajo los diferentes ajustes de temperatura se llevaron a cabo por triplicado, reportando el valor medio de las mediciones. Las concentraciones de gas se registraron como fracción molar de O_2 (yO_2) y CO_2 (yCO_2). Una muestra de 5 cm^3 de aire ambiental se introdujo en el contenedor para reemplazar el gas retirado.

En la cinética de respiración, el consumo de O_2 (rO_2) y las tasas de producción de CO_2 (rCO_2) de las muestras de uchuvas se estimaron experimentalmente para cada temperatura utilizando las ecuaciones 2.1 y 2.2 (Mendoza *et al.*, 2016):

$$rO_2(t) = \left(\frac{V}{W}\right)\left(\frac{YO_{2\,t-1} - YO_{2\,t+1}}{\Delta t}\right) \quad (2.1)$$

$$rCO_2(t) = \left(\frac{V}{W}\right)\left(\frac{YCO_{2\,t-1} - YCO_{2\,t+1}}{\Delta t}\right) \quad (2.2)$$

Donde, rO_2 (t) y rCO_2 (t) son las tasas de respiración en el tiempo (t) ($cm^3\ kg^{-1}\ d^{-1}$), V es el volumen libre del empaque (cm^3), W es el peso de la muestra (kg) y Δt es el tiempo transcurrido entre dos mediciones consecutivas (d). $YO_{2\,t-1}$, $YCO_{2\,t-1}$ son las fracciones molares de O_2 y CO_2 en la medición anterior al tiempo (t). $YO_{2\,t+1}$, $YCO_{2\,t+1}$ son la siguiente medición al tiempo (t).

2.2.3 Determinación experimental de la velocidad de transpiración

Inicialmente, para determinar la influencia de la humedad relativa (HR) en la transpiración de la fruta se almacenaron 0,150 ± 0,001 kg de uchuvas (aprox. 18-20 frutas) en la cámara climática mencionada con anterioridad a una temperatura constante de 10,5 ± 0,5 °C y 51, 61 y 90 ± 1% HR. Los frutos fueron colocados en bandejas abiertas en los compartimentos de la

cámara en el que el aire circulaba a baja velocidad (flujo laminar) horizontalmente con alimentación de presión positiva en el lado derecho de la cámara y retorno de presión negativa a la izquierda para distribuir el flujo de aire uniformemente. La cámara tiene un sensor de humedad capacitivo con un control activo del microprocesador para humidificar y deshumidificar y autodiagnóstico para alcanzar rápidamente la humedad establecida y tiempos de recuperación muy cortos evitando la formación de condensados. Para mantener una baja variación en la temperatura y HR de la prueba, el gabinete sólo se abrió durante 2-3 segundos en cada medición, tomando las muestras y determinando su cambio de peso.

Se midió el peso de la fruta a lo largo del tiempo para cada HR durante 4,5 días. El peso de la fruta se registró con una balanza analítica Ohaus PA-3102 (OHAUS Corp. Pine Brook, NJ, EE. UU.). Luego, para determinar la influencia de la temperatura, se almacenaron 0.155 ± 0.000 kg de frutos a 75 ± 1% HR y 5.5 °C, 10.5°C y 17°C ± 0.5 °C por 15.8 días, registrándose nuevamente el peso de las muestras a lo largo del experimento. La tasa de transpiración se expresó en función de la pérdida de peso en el fruto (Castellanos *et al.*, 2016; Gómez, Castellanos y Herrera, 2019) mediante la ecuación 2.3:

$$r_{H_2O} = -\left(\frac{1}{W_t}\right)\frac{W_{t-1}-W_{t+1}}{t_{-1}-t_{+1}} \quad (2.3)$$

En donde, W_t corresponde al peso del fruto en el tiempo t, t es el tiempo de cada medida, t-1 es el tiempo para la medida anterior al tiempo t y t+1 es el tiempo posterior para la medida al tiempo t.

2.2.4 Modelamiento matemático de la cinética de respiración

Se propusieron tres cinéticas diferentes para representar el proceso de respiración de los frutos de uchuva, expresadas como las tasas de consumo de O_2 y producción de CO_2. Se utilizó la cinética enzimática Michaelis-Menten simple (MM) y con inhibición no competitiva causada por CO_2 (MMA), y también la cinética química de la ley de poder (LP) que se han utilizado en varios estudios previos para este fin (Gómez, Castellanos y Herrera, 2019; Ghosh y Dash, 2018; Mangaraj y Goswami, 2011; Mendoza *et al.*, 2016; Pereira *et al.*, 2017).

La simple cinética Michaelis-Menten (MM) se basa en una reacción enzimática limitante donde el sustrato es O_2 para describir el consumo de O_2 (rO_2) y las tasas de producción de CO_2 (rCO_2) (Castellanos y Herrera, 2017; Pereira *et al.*, 2017). En este caso se considera que no hay inhibición por CO_2 y se representa con las ecuaciones 2.4 y 2.5.

$$r_{O_2} = \frac{r_{O_{2max}} y_{O_2}}{K_{m_{O_2}} + y_{O_2}} \quad (2.4)$$

$$r_{CO_2} = \frac{r_{CO_{2max}} y_{O_2}}{K_{m_{CO_2}} + y_{O_2}} \quad (2.5)$$

Donde, yO_2, es la fracción molar de O_2 en la atmósfera, rO_2max y rCO_2max son las tasas máximas de consumo O_2 y producción de CO_2 respectivamente ($cm^3\ kg^{-1}\ d^{-1}$) y KmO_2 y $KmCO_2$ son la constante de disociación de la enzima-complejo de sustrato o la fracción molar de O_2 correspondiente a la mitad de las tasas máximas de respiración.

La cinética no competitiva Michaelis-Menten (MMA) considera que el CO_2 actúa como un inhibidor de la respiración cuando no se une con la enzima o el sustrato, sino que se une con el complejo enzima-sustrato de manera reversible. En este caso, las ecuaciones 2.6 y 2.7 describen la relación entre las tasas de respiración y las fracciones de molares O_2 y CO_2 en la atmósfera que rodea el producto (Gómez, Castellanos y Herrera, 2019; Mangaraj y Goswami, 2011; Mendoza *et al.*, 2016).

$$r_{O_2} = \frac{r_{O_{2max}} y_{O_2}}{K_{m_{O_2}} + y_{O_2}\left(1 + \frac{y_{CO_2}}{K_{mu_{CO_2}}}\right)} \quad (2.6)$$

$$r_{CO_2} = \frac{r_{CO_{2max}} y_{O_2}}{K_{m_{CO_2}} + y_{O_2}\left(1 + \frac{y_{CO_2}}{K_{mu'_{CO_2}}}\right)} \quad (2.7)$$

En las ecuaciones 2.6 y 2.7, $KmuCO_2$ y $Kmu'CO_2$ son las constantes de inhibición por CO_2 para el consumo O_2 y la producción de CO_2, respectivamente.

En la cinética química (LP), el proceso respiratorio se describe considerando el orden de reacción aparente para las especies involucradas, O_2 y CO_2 (Duan, Wang y Hu, 2009; Gómez *et*

al., 2019). La relación de las tasas de respiración con las concentraciones de gases en la atmósfera se describe con las ecuaciones 2.8 y 2.9:

$$r_{O_2} = k_{O_2} y_{O_2}^{a_{O2}} y_{CO_2}^{b_{O2}} \quad (2.8)$$

$$r_{CO_2} = k_{CO_2} y_{O_2}^{a_{CO2}} y_{CO_2}^{b_{CO2}} \quad (2.9)$$

Donde, k_{O2} y k_{CO2} son los coeficientes de velocidad ($cm^3\ kg^{-1}\ d^{-1}$) y a_{O2}, b_{O2}, a_{CO2} y b_{CO2} son órdenes de reacción aparente para el consumo O_2 y la producción de CO_2, respectivamente.

La dependencia de la temperatura de los parámetros de respiración en las ecuaciones 2.4 a 2.9 fue considerada y representada mediante el uso de una ecuación de Arrhenius (ecuación 2.10):

$$p(T) = p_{ref} e^{-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)} \quad (2.10)$$

Donde p(T) es el parámetro de respiración de las ecuaciones 2.4 a 2.9 (r_{O2max}, K_{mO2}, k_{O2}, etc.), p_{ref} es el valor del parámetro a temperatura T_{ref} (298.15 K para este estudio), Ea es la energía de activación ($kJ\ mol^{-1}$) que indica la sensibilidad de la variación de cada parámetro de respiración con temperatura y R es la constante de gas (0.008314 $kJ\ mol^{-1}\ K^{-1}$).

2.2.5 Regresión de los parámetros de la cinética de la respiración

Para obtener los parámetros de las ecuaciones. 2.4 a 2.10 de respiración, se realizó una regresión multiparamétrica no lineal ajustando las ecuaciones de cada cinética además de la ecuación 2.10 para cada parámetro. La función 'lsqcurvefit' de Matlab® se utilizó para la optimización de los parámetros de toda la cinética de respiración.

La regresión se realizó ajustando los datos experimentales y los datos estimados con base en las ecuaciones 2.1 y 2.2 minimizando la suma de los errores residuales y maximizando los coeficientes de determinación ajustados (R^2adj) por cada cinética propuesta. Los R^2adj se utilizan en la regresión múltiple para ver el grado de efectividad de las variables

independientes para explicar el comportamiento de la variable dependiente y permiten comparar de manera homogénea modelos con distinto número de variables independientes. (Martínez Rodríguez, 2005; Spiess *et al.*, 2010), razón por la cual la cinética de respiración con el R^2adj más alto o cercano a 1 fue seleccionada para ser incluida para describir el proceso de transpiración de los frutos.

2.2.6 Cinética de transpiración

El cambio de peso a través del tiempo para la fruta almacenada se puede describir con la ecuación 2.11:

$$\frac{dW_f}{dt} = -W_f r_{H_2O} \quad (2.11)$$

Donde, $\frac{dW_f}{dt}$ es la pérdida de peso en el tiempo, W_f es el peso de la fruta (kg), t es el tiempo de almacenamiento (d), y rH_2O es la tasa de pérdida de peso de la fruta (kg kg^{-1} d^{-1}).

Teniendo en cuenta que la pérdida de peso en la fruta está relacionada con la humedad evaporada y que otras causas de pérdida de peso son insignificantes, entonces r_{H_2O} es la tasa de transpiración. Esta tasa puede representarse usando la ecuación 2.12 (Castellanos *et al.*, 2016):

$$r_{H_2O} = \frac{\alpha q_r}{\lambda} + k_f \left(a_{wf} - \frac{RH}{100}\right) \quad (2.12)$$

Donde q_r es el calor respiratorio en el fruto, α es la fracción de q_r que efectivamente resulta en la evaporación del agua, λ es el calor latente de la vaporización del agua, kf es el coeficiente de transferencia masiva de vapor de agua que relaciona la velocidad de transferencia de vapor de agua de la fruta dependiendo del cambio de actividad del agua (entre la fruta y la atmósfera circundante) como la fuerza motriz; a_{wf} es la actividad de agua de la fruta y HR es la humedad relativa de la atmósfera.

Los parámetros de Ecuaciones 2.11 y 2.12 se puede obtener bajo los siguientes supuestos:

1. La temperatura y la humedad relativa de la atmósfera permanecen constantes.
2. La temperatura de la fruta es constante.

3. El peso del agua perdida por el fruto no se puede recuperar.

4. Cuando la actividad de agua en la atmósfera sea mayor que la actividad de agua del fruto, el fruto no recuperaría el agua debido a un diferencial negativo por lo cual se simplifica la ecuación 2.12 a:

$$r_{H_2O} = \frac{\alpha q_r}{\lambda} \quad (2.13)$$

El porcentaje de pérdida de peso acumulada (CWL) se puede representar a través de la ecuación 2.14 como:

$$\%\, CWL = 100 \frac{W_{fini} - W_f}{w_{fini}} \quad (2.14)$$

Donde W_{fini} es el peso inicial de la fruta.

2.2.7 Acoplamiento de la cinética respiratoria al modelo de transpiración

La tasa de transpiración es una función de la cinética de la respiración. Esta dependencia se expresa a través de los términos relacionados con el calor de la respiración en el fruto, αq_r en las ecuaciones 2.12-2.13, donde q_r es el calor de la respiración y α es la fracción del calor de la respiración que se utiliza para evaporar el agua en el proceso de transpiración. El calor de la respiración (kJ kg^{-1} d^{-1}) se puede calcular en función de la frecuencia de respiración por medio de la ecuación 2.15 (Castellanos, *et al.* 2016; Canción, *et al.* 2002):

$$q_r = \left(\frac{E}{6*R}\right)(r_{CO2})\left(\frac{P}{T}\right) \quad (2.15)$$

Donde E es la energía liberada en la combustión de un mol de un monosacárido de seis carbonos para generar 6 moles de CO_2 (aproximadamente 2816 kJ). rCO_2 es la tasa de producción de CO_2 en cm^3 kg^{-1} d^{-1}, P es la presión (kPa), T es la temperatura(K) y R es la constante de gas (en este caso 8314 cm^3 kPa mol^{-1} K^{-1}). La tasa de producción de CO_2 está representada por la cinética de respiración descrita en la sección 2.4.4.

2.2.8 Influencia de la temperatura en la velocidad de transpiración

En las ecuaciones 2.12-2.13, varios parámetros dependen de la temperatura. El calor latente del agua (entalpia de vaporización) puede estar representado por la ecuación 2.16 (Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos [ASABE], 1979):

$$\lambda = 2502.535 - 2.386(T - 273.15) \quad (2.16)$$

Donde λ está dado en kJ kg^{-1} y T está en K.

El calor de la respiración también varía según la temperatura y esta variación se representa calculando la tasa de producción de CO_2 (rCO_2) a cada temperatura, incluida la ecuación de Arrhenius (Ecuación 2.10) para los parámetros de la cinética de la respiración.

El coeficiente de transferencia de masa de evaporación en la fruta (*kf*) también es función de la temperatura y esta relación se puede describir usando la ecuación de Arrhenius (Gómez *et al.*2019):

$$k_f = k_{f\,ref} e^{-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{ref}}\right)} \quad (2.17)$$

Donde k_{fref} es el coeficiente de transferencia de masa (kg kg^{-1} d) a la temperatura Tref, Ea es la energía de activación (kJ mol^{-1}) y R es la constante del gas (0,008314 kJ mol^{-1} K^{-1}).

2.2.9 Cálculo de la actividad de agua en la fruta

Para la estimación de la tasa de transpiración de las ecuaciones 2.12-2.13 se ha demostrado en estudios previos que la actividad de agua se mantiene aproximadamente constante durante el proceso de transpiración (Bovi *et al*., 2016; Castellanos *et al*., 2016; Gómez *et al*., 2019; Sousa-Gallagher *et al*., 2013). Esta suposición dio lugar a resultados satisfactorios en estos estudios al observar una relación aproximadamente lineal entre la pérdida de peso del producto y el tiempo de almacenamiento. Sin embargo, el agua perdida debe afectar tanto el contenido de humedad como la actividad del agua (la relación de la presión de vapor del agua en el producto a la presión del agua pura) aumentando continuamente la proporción de sólidos. Teniendo en cuenta lo anterior, en este estudio, la influencia del cambio en la actividad de agua en la tasa de transpiración se determinó a partir de un modelo para representar a_w en función del contenido de humedad. En este caso se asumió que no existe un perfil de actividad de agua dentro del fruto dado el pequeño diámetro de las muestras evaluadas (15-22 mm) y su piel fina (<0.1 mm).

Con base en los resultados experimentales descritos posteriormente en el apartado de discusión, la relación entre la humedad del fruto en base húmeda, *M* (en kg kg^{-1}) y a_w se representó mediante un modelo logístico (2.18):

$$M = M_0 - \frac{M_0 - M_e}{1 + e^{k\left(a_w - a_{w1/2}\right)}} \quad (2.18)$$

Resolviendo y aislando a_w:

$$a_w = a_{w1/2} + \frac{1}{k} ln\left(\frac{M_0 - M_e}{M_0 - M} - 1\right) \quad (2.19)$$

En las ecuaciones 2.18 y 2.19, M_0 corresponde al contenido inicial de humedad, *Me* es la humedad del equilibrio, *k* es una tasa constante, y $a_{w1/2}$ es la actividad de agua de rotación media que corresponde al punto en el que la curva de datos cambia de dirección.

El contenido de humedad (base húmeda) es una función del peso de la fruta (Wf) y del peso seco de la fruta (Ws), este último debió ser medido al principio del experimento. Con la ecuación 2.20 hay una relación entre el contenido de humedad y el peso de la fruta. Asimismo, considerando los Ecuación 2.18 y las ecuaciones 2.12-2.13 hay una relación entre la humedad, el peso, la actividad de agua en la fruta, y la tasa de transpiración.

$$M = \frac{W_f - W_s}{W_f} = 1 - \frac{W_s}{W_f} \quad (2.20)$$

2.2.10 Regresión de parámetros para el cálculo de la actividad de agua y la cinética de transpiración

La regresión de los parámetros de transpiración (ecuaciones 2.12-2.13) se llevó a cabo en tres etapas a partir de los resultados experimentales obtenidos. En primer lugar, para estimar los parámetros de la isoterma de sorción de humedad que describe la relación humedad-actividad del agua (ecuaciones 2.18-2.19), se realizó una regresión con los datos experimentales utilizando la función 'lsqcurvefit' de Matlab® con un método de regresión de mínimos cuadrados no lineal. En segundo lugar, con los datos experimentales obtenidos en el

experimento de pérdida de peso en temperatura constante, los parámetros α *y* *kf* se determinaron integrando numéricamente la ecuación 2.12 con la función 'ode15s' de Matlab® y de nuevo se realizó una regresión no lineal con los datos experimentales utilizando la función 'lqscurvefit'. Los parámetros encontrados para la actividad del agua y el contenido de humedad en la ecuación 2.19 se incluyeron en el cálculo.

Por último, a partir de los datos experimentales obtenidos a diferentes temperaturas con humedad relativa constante, se estimaron los valores de *kf*ref y Ea en la ecuación 2.17 realizando una regresión múltiple no lineal de los datos con la función 'lsqcurvefit' e integrando la ecuación 2.12 con la función 'ode15s' la cual utiliza el método matemático de orden variable para resolver ecuaciones diferenciales. Para el cálculo, la fracción del calor de la respiración α que se obtuvo previamente en el experimento en T constante se utilizó junto con los parámetros a_w de la ecuación 2.19. Una vez más, todas las regresiones se realizaron minimizando la suma de errores residuales y maximizando los coeficientes de determinación ajustados (R^2adj) para la cinética de transpiración.

2.3 Resultados

2.3.1 Modelado respiración en uchuva

Los resultados experimentales obtenidos mostraron un cambio en las concentraciones de O_2 y CO_2 dentro de los recipientes herméticos con frutos almacenados bajo las diferentes temperaturas evaluadas (Figura 2.1). Se observó que el descenso de temperatura influye directamente en el comportamiento de los gases, a 5,5 °C se ralentizo de manera estadísticamente significativa ($p<0,05$) el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono. En el tercer día de la prueba, los recipientes herméticos almacenados a 5,5 °C alcanzaron niveles de O_2 cercanos a 0,1 (fracción molar), mientras que a temperaturas más altas (17,1 °C y 25,6 °C) la concentración de O_2 se redujo siendo <0,01 (fracción molar) y la concentración de CO_2 aumentó por encima de 0,2 (fracción molar). Según Bohdziewicz y Czachor, (2016) y Olivares-Tenorio *et al.*, (2017), reducir la temperatura de almacenamiento a valores entre 0 y 10 °C puede disminuir significativamente la velocidad de los procesos metabólicos y extender la vida útil, en comparación con temperaturas más altas.

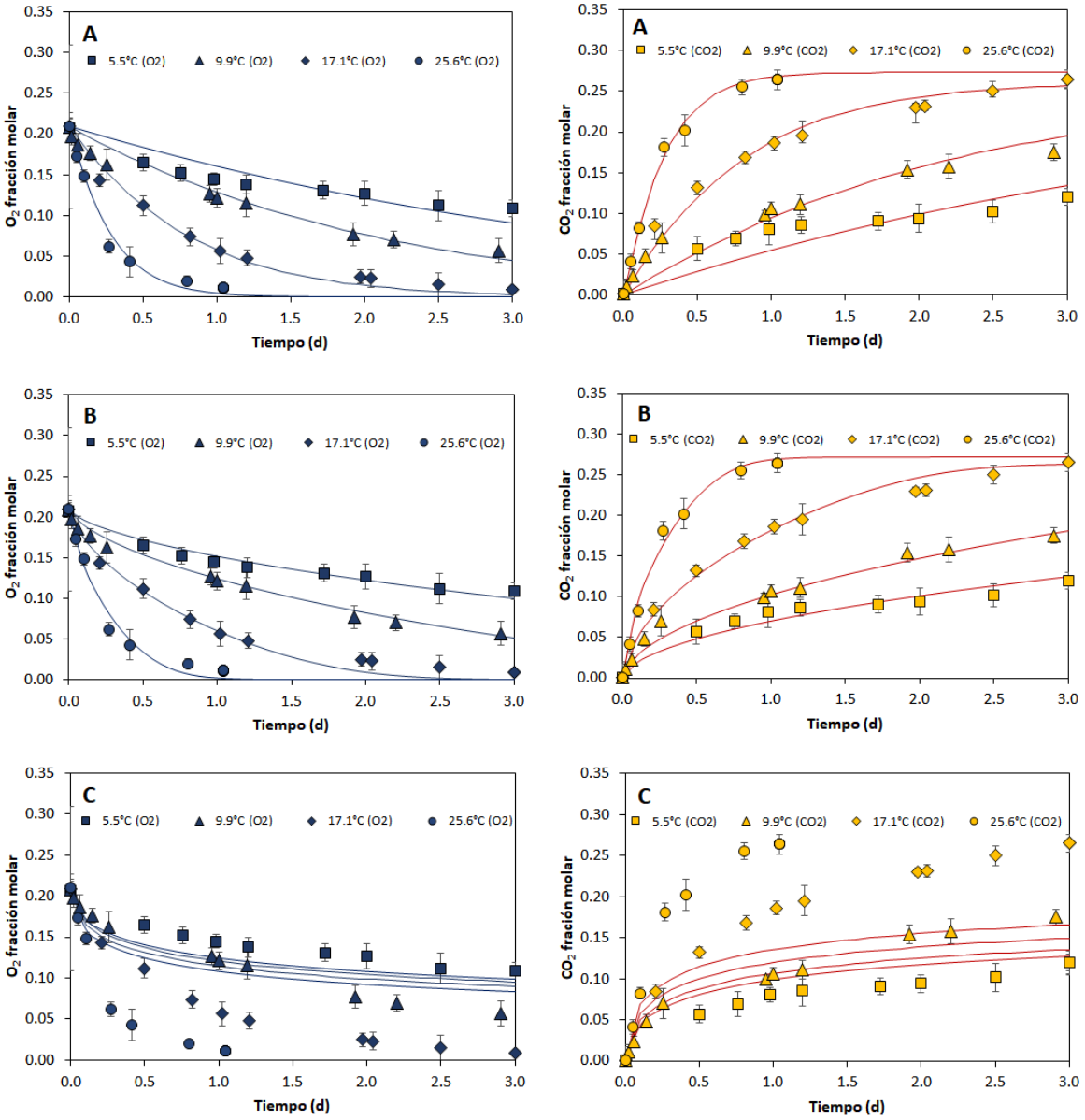


Figura 2.1 Evolución de las concentraciones de O_2 (izquierda) y CO_2 (derecha) a diferentes temperaturas. Datos experimentales (figuras) y valores estimados (líneas) con las cinéticas MM (A), MMA (B) y LP (C), respectivamente. Desviación estándar (DE) incluida para n = 3.

Lo mismo se puede observar en la Figura 2.2 (símbolos geométricos) para las tasas experimentales de consumo de O_2 y producción de CO_2 con valores menores a 500 $cm^3\ kg^{-1}\ d^{-1}$ a temperaturas inferiores a 10 °C. Asimismo, la reducción de la concentración de O_2 tiene un efecto significativo sobre los cambios en los niveles de O_2 y CO_2 y las tasas de respiración con

reducciones de aproximadamente del 50% en estos procesos cuando la concentración de O_2 se reduce a niveles entre 0,14 y 0,18 (fracción molar).

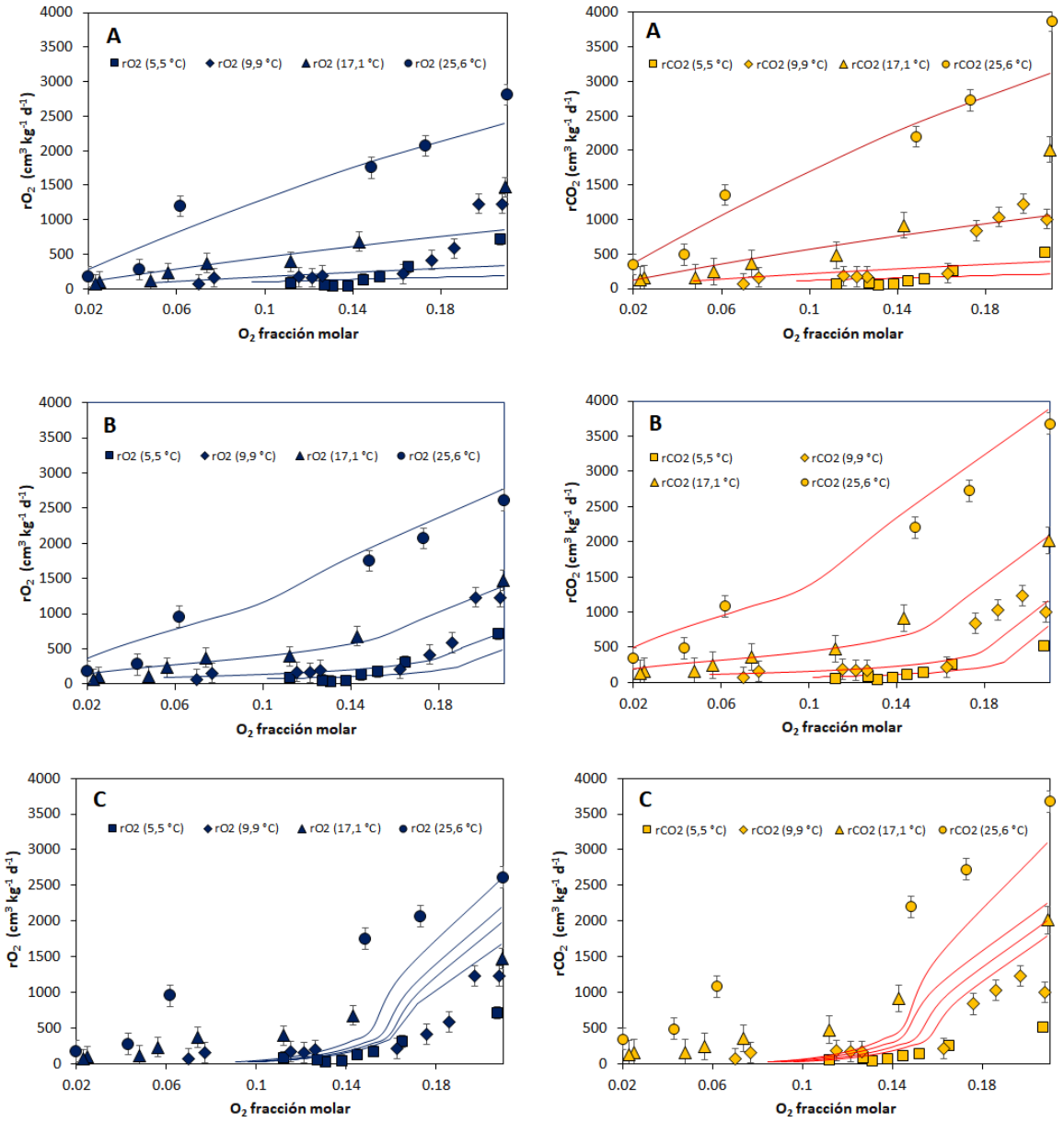


Figura 2.2 Cambios en el consumo de O_2 (izquierda) y las tasas de producción de CO_2 (derecha) de los frutos de uchuva en función de la fracción molar de O_2 a diferentes temperaturas. Datos experimentales (figuras) y valores estimados (líneas) con las cinéticas MM (A), MMA (B) y PL (C). Desviación estándar (DE) incluida para n = 3.

A partir de las fracciones molares experimentales de O_2 y CO_2 y las tasas de respiración estimadas con las ecuaciones. 2.1 y 2.2, se realizaron múltiples regresiones no lineales para las cinéticas LP, MM y MMA. En las Figuras 2.1A y 2.2A, se observa que las cinéticas MM y MMA (líneas) tienen una alta bondad de ajuste en comparación con los datos experimentales. Por el contrario, la cinética de LP no parece representar el comportamiento experimental ya que los datos obtenidos escasamente son predichos a través de este modelamiento matemático. Para este estudio, la cercanía de la cinética de MMA con los datos experimentales fue muy satisfactoria (R^2_{adj} O_2 = 0,964; R^2_{adj} CO_2= 0,981), siendo posible describir el comportamiento experimental bajo todas las temperaturas y en el rango de concentraciones de gas evaluadas como se muestra en las Figuras 2.1B y 2.1B. Para la cinética de LP, la no dependencia de la temperatura de los órdenes de reacción aparentes se mantuvo como restricción, dado que en esta cinética el proceso respiratorio se describe a través de estequiometria, siendo un análisis que no depende de la temperatura si no de las especies involucradas. Solo el coeficiente de tasa se consideró variable dando como resultado la obtención de una mala representación de los datos experimentales observados (Figura 2.1C).

Como se ve en la Figura 2.2 A/B, la cinética de respiración de Michaelis-Menten (ecuaciones 2.4-2.7), la dependencia de la temperatura se puede representar adecuadamente al incluir la ecuación de Arrhenius (ecuación 2.10). En este caso, solo el parámetro Km para el consumo de O_2 parece tener una baja dependencia de T con E_a = 2,95 kJ mol^{-1} para MM y 1.665 kJ mol^{-1} para MMA, mientras que los otros parámetros tienen valores de E_a superiores a 17 kJ mol^{-1} (Tabla 2.1). Esto es consistente con resultados de otros estudios sobre el uso de la ecuación de Arrhenius para explicar la influencia de la temperatura en los parámetros respiratorios (Agudelo, Restrepo y Zapata, 2016; Fonseca *et al.*, 2018; Oliveira y Sousa-Gallagher, 2017).

La Tabla 2.1. muestra los parámetros para cada cinética y los valores de R^2adj. para O_2 y CO_2. La bondad de ajuste más baja con los datos experimentales es la cinética LP mientras que el grado de ajuste más alto fue el de la cinética MMA (R^2_{adj}. = 0,964 para O_2 y 0,981 para CO_2). Este comportamiento ya se ha observado en la aplicación de la cinética enzimática MMA al describir la respiración de otros productos frescos (Gómez *et al.*, 2019; Mangaraj y Goswami, 2011; Mendoza *et al.*, 2016), en estos estudios, la cinética de MMA ha descrito mejor el

comportamiento experimental en comparación con la cinética MM simple al considerar el efecto inhibidor del CO_2, el cual aumenta su concentración producto de la respiración de fruto y que finalmente se acumula en el recipiente hermético (Figura 2.1). Esta acumulación resultará en una reducción adicional en las tasas de respiración además del O_2 en el espacio de cabeza del sistema cerrado.

Tabla 2.1 Parámetros de respiración estimados para los modelos ley de potencia, Michaelis-Menten simple y Michaelis-Menten anticompetitivo con inhibición CO_2 y Arrhenius para frutos de uchuva.

Cinéticas de respiración	Parámetro	Consumo O_2	Producción CO_2	R^2_{adj}
Ley de potencias cinética química (LP)	*a*	4,179 ± 0,477	4,288 ± 0,479	O_2= 0,647; CO_2= 0,247
	b	0,617 ± 0,070	0,581 ± 0,064	
	k (*cm³ kg⁻¹ d⁻¹*)			
	k_{ref} a 23 °C (cm³ kg⁻¹ d⁻¹)	240543,900 ± 27461,600	431308,300 ± 5141,380	
	E_a (kJ mol⁻¹)	27.103 ± 3,094	32.031 ± 3,575	
Michaelis-Menten (MM)	r_{max} (*cm³ kg⁻¹ d⁻¹*)			O_2 = 0,940; CO_2= 0,941
	rmax ref a 23 °C (*cm³ kg⁻¹ d⁻¹*)	9882,260 ± 1128,210	12109,340± 1349,610	
	E_a (kJ mol⁻¹)	90,346 ± 10,314	106,863 ± 11.927	
	K_m			
	$K_{m\ ref}$ a 23 °C	0,950 ± 0,108	0,900 ± 0,099	
	E_a (kJ mol⁻¹)	2,950 ± 0,337	17,048 ± 1,903	
Michaelis-Menten Anticompetitiva (MMA)	r_{max} (*cm³ kg⁻¹ d⁻¹*)			O_2 = 0,964; CO_2= 0,981
	$r_{max\ ref}$ a 23 °C (*cm³ kg⁻¹ d⁻¹*)	15069,740 ± 1620,43	29967,870 ± 3144,920	
	E_a (kJ mol⁻¹)	60,195 ± 6,672	60,475 ± 5,750	
	K_m			
	$K_{m\ ref}$ a 23 °C	60,195 ± 6,672	0,818 ± 0,091	
	E_a (kJ mol⁻¹)	60,195 ± 6,672	17,676 ± 1,572	
	K_{mu}			
	K*mu ref* a 23 °C	60,195 ± 6,672	0,006 ± 0,000	
	E_a (kJ mol⁻¹)	57,435 ± 6,217	55,485 ± 5,193	

Desviación estándar (DE) para n = 3.

2.3.2 Modelado actividad de agua y transpiración en uchuva

La Figura 2.3 muestra la isoterma de sorción de humedad experimental donde el contenido de humedad (base húmeda) está relacionado con la actividad del agua en los frutos de uchuva, inicialmente con una alta disminución de a_w a humedad prácticamente constante, luego una alta disminución de humedad con una disminución menor en a_w y luego de nuevo, un cambio mayor en a_w con humedad muy baja (cercana a cero) y prácticamente constante.

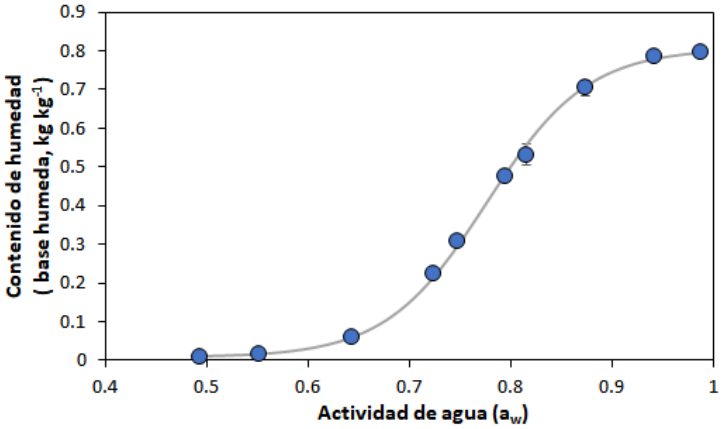


Figura 2.3 Cambios en el contenido de humedad en función de la actividad de agua para frutos de uchuva. Datos experimentales (figuras) y valores estimados (líneas) con modelo logístico. Desviación estándar (DE) para n = 3. (DE despreciable en el grafico debido a la magnitud de los valores obtenidos).

Esto se puede atribuir a la evaporación inicial del agua libre contenida en el tejido del fruto y luego a la posterior pérdida del agua atrapada o unida a la célula vegetal. La curva de datos experimentales tiene una forma característica de "S", por lo que se utilizó la ecuación 2.18 de tipo logístico para el ajuste (Sierra *et al.*, 2019), luego de comparar previamente con otros modelos como el modelo Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) (Aviara, 2020; Saad, *et al.* 2014). El modelo GAB tuvo una menor cercanía al comportamiento experimental. Sin embargo, la ecuación 2.18 tenía una alta bondad de ajuste (R^2adj = 0,998) y los parámetros se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros estimados para el modelo de transpiración, incluida la estimación de la actividad de agua de uchuva. Desviación estándar (DE) para n = 3

Parámetros de actividad de agua-contenido de humedad			
M_0 (kg kg^{-1})	M_e (kg kg^{-1})	K	$a_{w1/2}$
0,808 ± 0,009	0,006 ± 0.000	20,019 ± 0,213	0,776 ± 0,008
	R^2_{adj} = 0,998		
Parámetros de transpiración			
Pruebas a temperatura constante			
Fracción del calor de la respiración (α)		0,141 ± 0.013	
Coeficiente de transpiración (k_f) a 10,5 °C (kg kg^{-1} d)		0,016 ± 0,002	
	R^2_{adj} = 0,999		
Pruebas a humedad relativa constante			
k_{fref} at 23 °C (kg kg^{-1} d)		0,066 ± 0,006	
E_a (kJ mol^{-1})		92,514 ± 7,964	
	R^2_{adj} = 0,998		

Una vez que se obtuvieron los parámetros de la isoterma logística de sorción de humedad, con base en la ecuación 2.19 que describe la relación de a_w en función del contenido de humedad de la fruta, fue posible representar el uso de la ecuación 2.20 para la actividad del agua en función del peso del fruto (base húmeda). Todas estas ecuaciones se combinaron en el modelo de transpiración y luego se realizaron las regresiones múltiples no lineales para obtener los parámetros de transpiración.

2.3.3 Cinética de transpiración

La Figura 2.4 muestra las tasas de transpiración (2.4A) y el porcentaje de pérdida de peso acumulada (2.4B) en los frutos de uchuva a diferentes HR y 10,5 °C. Se observó un comportamiento aproximadamente constante en las tasas de transpiración que corresponde a una pérdida de peso aproximadamente lineal. La pérdida de peso (y la tasa de transpiración) fue mayor cuando la HR en el ambiente fue menor como se puede observar en la Figura 2.4. Este comportamiento es atribuible al mayor diferencial en presiones parciales y actividades de agua entre la fruta y la atmósfera que la rodea que constituye la fuerza impulsora para la transferencia de agua evaporada fuera de la fruta. Lo anterior ya se ha observado en otros estudios para productos frescos (Bovi *et al.*, 2016; Sousa-Gallagher, Mahajan y Mezdad, 2013). A partir de los datos obtenidos fueron estimados los parámetros de la ecuación 2.12 para 10,5°C considerando también los cambios en la actividad de agua y el peso del fruto. Específicamente, en esta prueba a temperatura constante se obtuvo la fracción del calor de

respiración que da como resultado la transpiración de humedad (α) y el coeficiente de transferencia de humedad (*kf*) relacionado con la diferencia en las actividades del agua indicada en la ecuación 2.12.

La bondad de ajuste en la regresión para los datos experimentales fue alta, R^2_{adj} = 0,999, como se muestra en la Tabla 2.2 (centro) y en la Figura 2.4 (líneas). En este caso, la inclusión del aporte del calor de la respiración (y la tasa de respiración en la ecuación 2.15), y los cambios en la actividad del agua, llevaron a una alta capacidad de predicción de la transpiración y pérdida de peso en las muestras a T constante. El valor de α estimado es bajo, a diferencia de otros estudios con valores superiores a 0,5 (Bovi *et al.*, 2018; Gómez, Castellanos y Herrera; Lufu, Ambaw y Opara, 2019). Esto indica un mayor uso de la energía generada en el proceso de respiración por los frutos de uchuva en sus procesos metabólicos con una baja proporción de energía disipada como calor que conduce a la evaporación de la humedad de la célula vegetal.

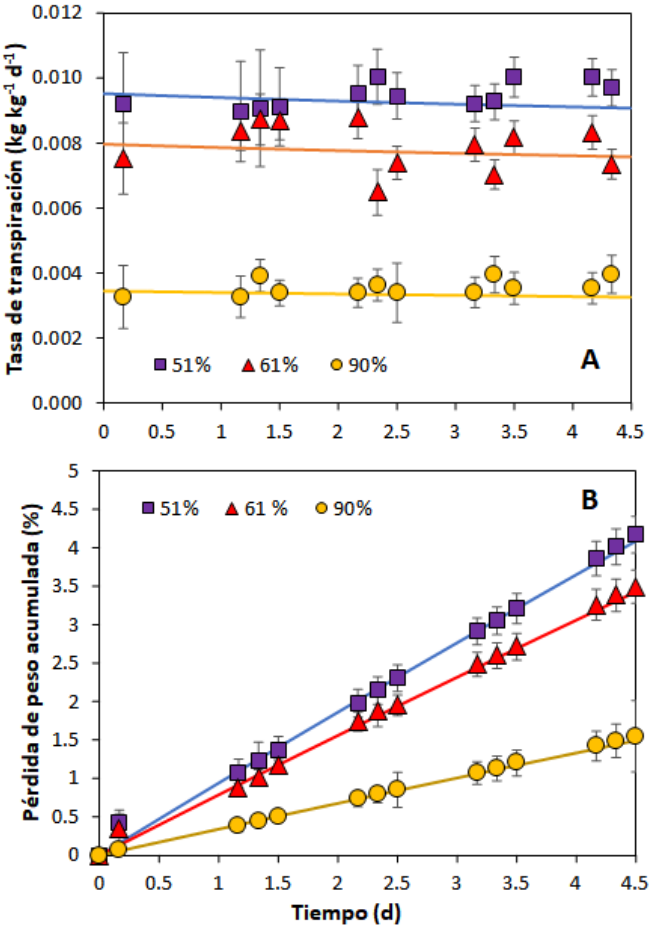


Figura 2.4 Velocidad de transpiración (A) y pérdida de peso acumulada (B) de frutos de uchuva a diferentes HR y 10,5 °C. Datos experimentales (figuras) y valores estimados (líneas) con el modelo de transpiración. Desviación estándar (DE) para n = 3.

En las pruebas a humedad relativa constante, también se midieron las tasas de transpiración y la pérdida de peso acumulada en función de la temperatura de almacenamiento, como se muestra en la Figura 2.5. Se observaron tasas de transpiración aproximadamente constantes para las tres temperaturas evaluadas (Figura 2.5A), con valores aproximadamente lineales que se corresponden con las pérdidas de peso lineales de las muestras (Figura 2.5B) a lo largo del tiempo de almacenamiento. Sin embargo, como se muestra en la Figura 2.5B, se puede observar una ligera reducción en la pendiente de la curva de datos experimentales a 17 °C para los últimos días de almacenamiento. La tasa de transpiración y la pérdida de peso en los frutos aumentaron con la temperatura, siendo mayor a 17 °C que a 5,6 °C. Esto se puede atribuir a la influencia de la temperatura en todos los procesos que componen la transpiración, con una

relación directa entre T y la cinética respiratoria y la tasa de transferencia de humedad del fruto (Bovi *et al.*, 2016; Castellanos, Herrera y Herrera, 2016). A partir de los datos obtenidos, los parámetros de Arrhenius (ecuación 2.17) se sometieron a regresión para determinar la influencia de la temperatura en la cinética de transpiración (ecuación 2.12).

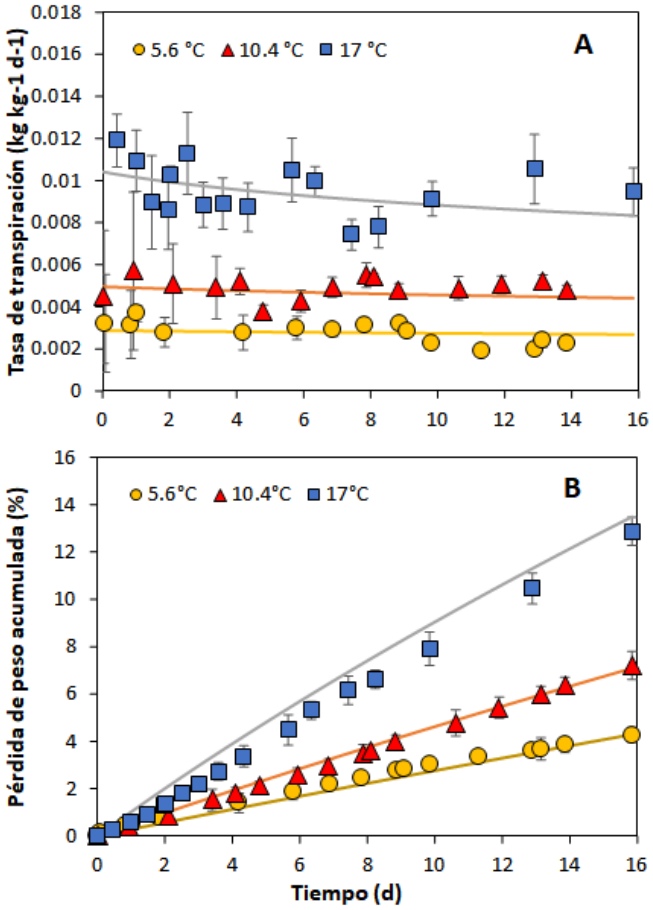


Figura 2.5 Velocidad de transpiración (A) y pérdida de peso acumulada (B) de frutos de uchuva a temperaturas diferentes y 75% de humedad relativa. Datos experimentales (cifras) y valores estimados (líneas) con el modelo de transpiración. Desviación estándar (DE) = 3.

Con los parámetros obtenidos para la prueba de HR constante mostrados en la Tabla 2.2, se estimaron los datos de transpiración y pérdida de peso para las temperaturas y HR evaluadas. Como se puede ver en la Figura 2.5, el modelo de transpiración tiene una alta bondad de ajuste en comparación con las medidas experimentales (R^2adj = 0,989) y puede predecir satisfactoriamente la pérdida de peso de la fruta en función de la temperatura de

almacenamiento. En este caso, la inclusión de la ecuación de Arrhenius permitió obtener una mejor correlación para describir el efecto de la temperatura en el rango de 5-17 °C de manera similar a los resultados obtenidos en estudios previos para otros productos frescos (Castellanos, Herrera Y Herrera, 2016; Gómez, Castellanos y Herrera, 2019).

El modelo combinado que se propone puede explicar la influencia de las condiciones de almacenamiento como la temperatura, la humedad relativa y los niveles de O_2 y CO_2 en el proceso de transpiración como se muestra en las Figuras 2.4 y 2.5. Asimismo, en el modelo propuesto, la transpiración en frutos de uchuva es explicado como una relación dinámica compleja que involucra diferentes componentes. Estos son el proceso respiratorio y el calor generado durante el mismo, la relación entre el contenido de humedad y la actividad del agua, y las diferencias en la presión parcial expresada como actividades del agua entre la fruta y la atmósfera. Todo lo anterior dará como resultado la transferencia continua de humedad del producto a la atmósfera circundante que se refleja en la pérdida de peso acumulada durante el tiempo de almacenamiento.

2.3.4 Prueba de Validación

En la prueba de validación a 17 °C, se obtuvo una alta bondad de ajuste entre los datos experimentales y los estimados con el modelo combinado de transpiración-respiración ($R^2_{adj.}$ = 0,991) como se puede observar en la Figura 2.6. Hubo un aumento casi lineal en la pérdida de peso acumulada, siendo esta mayor al reducir la HR en la atmósfera. De acuerdo con los resultados observados, la inclusión de la variación de la actividad de agua del fruto y el contenido de humedad, y el aporte del calor de respiración mejoraron la capacidad de predicción del modelo en comparación con estudios previos donde la actividad de agua se mantuvo constante (Castellanos, Herrera y Herrara, 2016; Bovi *et al.*, 2018). Para intervalos de tiempo cortos como en la prueba a temperatura constante descrita anteriormente (Figura 2.4), la actividad del agua puede considerarse constante debido al bajo porcentaje de humedad pérdida, pero a medida que el tiempo de almacenamiento se extiende como en la prueba a HR constante (Figura 2.5) o la prueba de validación (Figura 2.6), la pérdida de humedad será mayor con porcentajes superiores al 5%, lo que resultará en una reducción significativa de la actividad del agua (por debajo de 0,9) como se describe en la Figura 2.3.

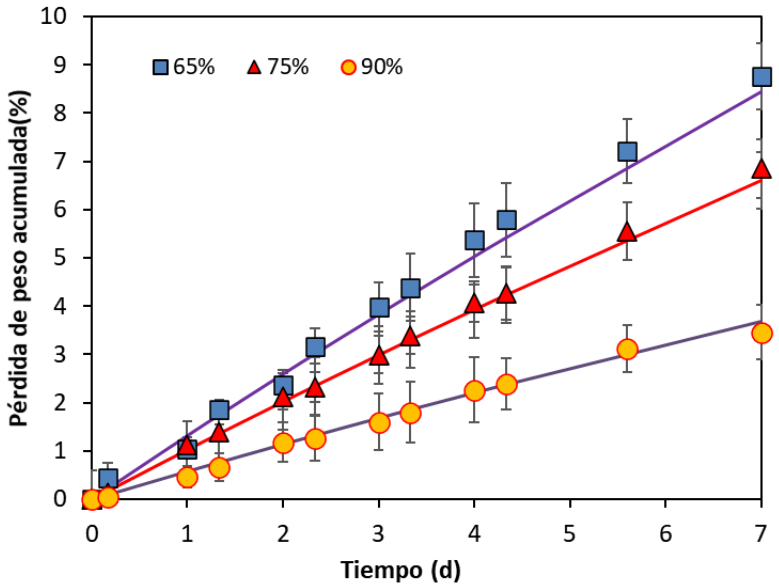


Figura 2.6 Pérdida de peso acumulada de frutos de uchuva a diferentes HR y 17 °C. Datos experimentales (figuras) y valores estimados (líneas) con modelo de integrado. Desviación estándar (DE) para n = 3.

Los resultados obtenidos tienen aplicación práctica en la configuración de sistemas de empaque y almacenamiento de uchuva y otras frutas. Para conservar mejor estos productos manteniendo sus propiedades de calidad, es necesario minimizar la pérdida de peso y los procesos de transpiración y respiración que influyen en ella. Además de trabajar en el rango de refrigeración (4-15 °C), manteniendo una HR alta en la atmósfera que rodea al producto es posible aumentar la vida útil de la fruta, en consecuencia, reducirá la tasa de disminución de a_w y la evaporación de la agua. Asimismo, en un sistema de envasado adecuadamente configurado (Ej. empaques de atmósfera modificada en equilibrio, EMAP) los niveles de O_2 y CO_2 pueden regularse reduciendo la frecuencia respiratoria y manteniendo el sistema cerca de la saturación (HR = 0,85-0,95%). A partir del modelo combinado de respiración-transpiración que se propone en este estudio, se pueden realizar los balances de masa en el espacio de cabeza del empaque para regular la transferencia de gases y vapor de agua y obtener concentraciones de gas estables y convenientes para la conservación.

Finalmente, en este estudio se destaca la utilidad de la aplicación del proceso matemático de optimización multiparamétrica de regresión no lineal para calcular todos los parámetros

respiratorios (Michaelis-Menten y Arrhenius) y transpiración (cinética de transpiración y Arrhenius) simultáneamente. El proceso utilizado para los cálculos incluyó una función objetivo para minimizar la suma de errores residuales. Esta aproximación condujo a una mayor confiabilidad de los parámetros obtenidos con mejor bondad de ajuste y menores diferencias entre los datos estimados y los experimentales.

2.4 Conclusiones

La cinética respiratoria (consumo de O_2 y producción de CO_2) de los frutos de uchuva se describió en función de la temperatura y de las concentraciones de O_2 y CO_2 utilizando una cinética de Michaelis-Menten con inhibición no competitiva por CO_2 y la ecuación de Arrhenius (R^2adj = 0,964 y 0,981 respectivamente). A partir de los resultados experimentales de pérdida de peso en diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa, se propuso un modelo combinado para representar la transpiración en los frutos frescos considerando la cinética de respiración y la isoterma de sorción de humedad para las muestras obteniendo una alta bondad de ajuste (R^2adj = 0.988 y 0,998).

La relación entre el contenido de humedad y la actividad del agua se representó mediante el uso de un modelo logístico con una gran cercanía entre los datos experimentales y ajustados (R^2adj. = 0,998). El modelo combinado de transpiración y respiración propuesto en este estudio fue validado satisfactoriamente y se puede utilizar para estimar cambios en la pérdida de peso y la actividad de agua de frutos frescos de uchuva a diferentes temperaturas y HR, proporcionando los medios necesarios para mejorar los sistemas de almacenamiento y envasado y así aumentar la vida útil de este producto y otras frutas similares.

Referencias

Agudelo, C., Restrepo, C., y Zapata, J. E. (2016). Respiration kinetic of mango (Mangifera indica L.) as function of storage temperature. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 69(2), 7985–7995. https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59143

Agudelo-Rodríguez, G., Moncayo-Martínez, D., y Castellanos, D.A. (2020). Evaluation of a predictive model to configure an active packaging with moisture adsorption for fresh tomato. Food Packaging and Shelf Life, 23, 100458. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100458

Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos [ASABE] (1979). Psychrometric Data. ASAE D271.2 APR1979, R2014. http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=32006yt=2

Asociación Nacional de Exportadores [ANALDEX]. (2020). ¡Uchuva / Goldenberry nuestra Embajadora de frutas colombianas para el mundo! https://www.analdex.org/2020/06/30/uchuva-goldenberry-nuestra-embajadora-de-frutas-colombianas-para-el-mundo/

Aviara, N.A. (2020). Moisture Sorption Isotherms and Isotherm Model Performance Evaluation for Food and Agricultural Products, Sorption. In George Kyzas and Nikolaos Lazaridis, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.87996. https://www.intechopen.com/books/sorption-in-2020s/moisture-sorption-isotherms-and-isotherm-model-performance-evaluation-for-food-and-agricultural-prod

Balaguera-López, H., Espinal-Ruiz, M., Zacarías, L., y Herrera, A. (2017). Effect of ethylene and 1-methylcyclopropene on the postharvest behavior of cape gooseberry fruits (Physalis peruviana L.). Food Science and Technology International, 23(1), 86-96. Doi: 10.1177/1082013216658581.

Balaguera-López, H., Martínez, C., y Herrera, A. (2015). Refrigeration affects the postharvest behavior of 1-methylcyclopropene-treated cape gooseberry (Physalis peruviana L.) fruits with the calyx. Agronomía Colombiana, 33(3), 356. Doi: 10.15446/agron.colomb.v33n3.51896

Bohdziewicz, J., y Czachor, G. (2016). Changes of Mechanical Properties of Kumquat (Citrus Japonica Thunb.) and Cape Gooseberry (Physalis Peruviana L.) Fruits During Storage. Agricultural Engineering, 20(3), 15–25. https://doi.org/10.1515/agriceng-2016-0040

Bovi, G., Caleb, O., Linke, M., Rauh, C., Mahajan, P. (2016). Transpiration and moisture evolution in packaged fresh horticultural produce and the role of integrated mathematical models: A review. Biosystems Engineering, 150, 24-39. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.07.013

Bovi, G., Ruxa, G., Caleb, O., Herppich, W., Linke, M., Rauh, C., Mahajan, P. (2018). Measurement and modelling of transpiration losses in packaged and unpackaged

strawberries. Biosystems Engineering, 174, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.012

Caleb, O.J., Mahajan, P.V., Al-Said, F.A., y Opara, U.L. (2013). Transpiration rate and quality of pomegranate arils as affected by storage conditions. CyTA – Journal of Food. 11, 199–207. https://doi.org/10.1080/19476337.2012.721807

Castellanos, D.A., y Herrera, A.O. (2017). Modified Atmosphere Packaging: Design and Optimization Strategies for Fresh Produce. In I. Kahramanoglu (Ed.). Postharvest handling (pp. 85–106). InTech Open. https://doi.org/10.5772/intechopen.68498

Duan, H., Wang, Z., y Hu, C. (2009). Development of a simple model based on chemical kinetics parameters for predicting respiration rate of carambola fruit. International Journal of Food Science y Technology, 44(11), 2153-2160. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02054.x

Fischer, G., y Melgarejo, L.M. (2020). The ecophysiology of cape gooseberry (Physalis peruviana l.) - an andean fruit crop. a review. Revista colombiana de ciencias hortícolas, 14(1), 76-8. https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i1.10893

Fonseca, S.C., Gil, L., Manso, M.C., y Cunha, L.M. (2018). Modelling the influence of storage temperature and time after cutting on respiration rate of diced red onions (Allium cepa L. cv. Vermelha da Póvoa), 140, 27-33. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.02.003

Gómez, J.M., Castellanos, D.A., y Herrera, A.O. (2019). Modeling respiration and transpiration rate of minimally processed pineapple (Ananas comosus) depending on temperature, gas concentrations and geometric Configuration. Chemical Engineering Transactions, 75: 547-552. https://doi.org/10.3303/CET1975092

González-Locarno, M., Maza Pautt, Y., Albis, A., Florez López, E., y Grande Tovar, C.D. (2020). Assessment of Chitosan-Rue (Ruta graveolens L.) Essential Oil-Based Coatings on Refrigerated Cape Gooseberry (Physalis peruviana L.) Quality. Applied Sciences. 2020; 10(8), 2684. https://doi.org/10.3390/app10082684

Ghosh, T., y Dash, K.K. (2018). Respiration rate model and modified atmosphere packaging of bhimkol banana. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 11, (4), 186-195. https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.04.004

Guevara-Collazos, Aura., Villagrán-Munar, E., Velasquez-Ayala, Fabian A., y González-Velandia, K. (2019). Evaluation of the postharvest behavior of cape gooseberry from conventional and agroecological production systems. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 10(6), 1273-1285. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1492

Ho, P., Tran, D., Hertog, M., y Nicolai, B. (2020). Modelling respiration rate of dragon fruit as a function of gas composition and temperature. Scientia Horticulturae, 263, 109138. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109138

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (1999). Norma Técnica Colombiana NTC 4580. Frutas frescas. Uchuva. Especificaciones.

Jalali, A., Linke, M., Geyer, M., y Mahajan, P. (2020). Shelf-life prediction model for strawberry based on respiration and transpiration processes. Food Packaging and Shelf Life, 25, 100525. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100525

Lanchero, O., Velandia, G., Fischer, G., Varela, N. C., y García, H. (2007). Post-harvest behavior of cape gooseberry (Physalis peruviana L.) under active modified atmosphere conditions. Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8(1), 61-68. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:84

Lufu, R., Ambaw, A., y Opara, U.L. (2019). The contribution of transpiration and respiration processes in the mass loss of pomegranate fruit (cv. Wonderful). Postharvest Biology and Technology. 157, 110982. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110982

Martínez Rodríguez, M. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario Juridico y Economico Escurialense, 38, 315–331.

Mangaraj, S., y Goswami, T.K. (2011). Measurement and modelling of the respiration rate of guava (cv. Baruipur) for modified atmosphere packaging. International Journal of Food Properties, 14(3), 609-628. https://doi.org/10.1080/10942910903312403

Mendoza, R., Castellanos, D., García, J., Vargas, J., y Herrera, A. (2016). Ethylene production, respiration, and gas exchange modelling in modified atmosphere packaging for banana fruits. International Journal of Food Science and Technology, 51(3), 777-788. https://doi.org/10.1111/ijfs.13037

Olarte, S., y Suarez, M. (2019). Impacto de la perecidad de la Uchuva en su proceso de producción y distribución en Cundinamarca, Colombia. 58.

Olivares-Tenorio, M.L., Dekker, M., van Boekel, M.A.J.S., y Verkerk, R. (2017). Evaluating the effect of storage conditions on the shelf life of cape gooseberry (Physalis peruviana L.). LWT - Food Science and Technology, 80, 523–530. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.027

Pereira, M.J., Amaro, A.L., Pintado, M., y Poças, M.F. (2017). Modeling the effect of oxygen pressure and temperature on respiration rate of ready-to-eat rocket leaves. A probabilistic study of the Michaelis-Menten model. Postharvest Biology and Technology, 131, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.04.006

Procolombia. (2020). Ficha técnica uchuva. https://docs.procolombia.co/int-procolombia/es/exportaciones/ficha_uchuva_final.pdf

Tapia, M.S., Alzamora, S.M., Chirife, J. (2007). Effects of water activity (aw) on microbial stability: as a hurdle in food preservation. In G.V. Barbosa-Canovas, A.J.F. Fontana, S.J. Schmidt, y T.P. Labuza (Eds.), Water activity in foods (pp. 239–255). Oxford: Blackwell Publishing Ltd.

Saad, A., Touati, B., Draoui, B., Tabti, B., Abdenebi, A., y Benaceur, S. (2014). Mathematical Modeling of Moisture Sorption Isotherms and Determination of Isosteric Heats of Sorption of Ziziphus Leaves. Modelling and Simulation in Engineering, 2014: Article ID 427842. https://doi.org/10.1155/2014/427842

Song, Y., Vorsa, N., y Yam, K. L. (2002). Modeling respiration-transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry. Journal of Food Engineering, 53, 103-109. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00146-7

Sousa, A.R., Oliveira, J.C., y Sousa-Gallagher, M.J. (2017). Determination of the respiration rate parameters of cherry tomatoes and their joint confidence regions using closed systems. Journal of Food Engineering, 206, 13-22. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.02

Sousa-Gallagher, M., Mahajan, P.V., y Mezdad, T. (2013). Engineering packaging design accounting for transpiration rate: Model development and validation with strawberries.

Journal of Food Engineering, 119, 370-376. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.05.041

Spiess, A.N., y Neumeyer, N., (2010), An evaluation of R2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: A Monte Carlo approach, BMC Pharmacology, 10(6). https://doi.org/10.1186/1471-2210-10-6

Capítulo 3. Configuración de empaques biodegradables con atmósfera modificada en equilibrio (EMAP) para frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.*)*

Resumen

Se evaluaron diferentes sistemas de envasado con atmósfera modificada de equilibrio (EMAP) para frutos de uchuva. Se utilizaron tres empaques: bandejas de celulosa con película de celulosa (Cel/Cel), bandejas y película de ácido poliláctico (PLA/PLA) y bandejas de tereftalato de polietileno con película de polipropileno (PET/PP). La configuración de los contenedores y las perforaciones se predefinieron modelando la transferencia de gas en el sistema de empaque. Las frutas envasadas se almacenaron a 6 °C y 75 % de HR durante 6 semanas. Las frutas en las bandejas de PLA/PLA tuvieron una vida útil máxima de 42 días, mientras que las frutas en Cel/Cel llegaron 39 días en comparación con el empaque sintético y el control en los que los frutos alcanzaron 35 días y 21 días de vida útil respectivamente. Se obtuvieron concentraciones de gas de equilibrio similares entre los empaques EMAP, la mayor permeabilidad al vapor de agua del PLA evitó la formación de condensación con menor deshidratación en comparación con los empaques Cel / Cel y PP/PET.

3.1 Introducción

La uchuva es una fruta emergente con amplio potencial económico por sus características nutricionales y sensoriales (Olivares-Tenorio *et al.*, 2017; Ramadan, 2011; Torres-Ossandóna, 2018). Para mejorar las posibilidades de mercado de esta fruta exótica pero perecedera, es necesario implementar sistemas de empaque que brinden soluciones integradas de conservación manteniendo sus propiedades de calidad y extendiendo su vida útil para facilitar su distribución y comercialización (Herrera *et al.*, 2020; Olivares -Tenorio *et al.*, 2017). Se han

realizado varios estudios para el desarrollo de sistemas de envasado de atmósferas activas y / o modificadas para productos similares a la uchuva (Belay *et al.*, 2018; Bovi *et al.*, 2018; Pérez *et al.*, 2020). En estos sistemas se ha buscado solucionar varios problemas relacionados con la pérdida de vida útil, como el control de la maduración y senescencia y la actividad microbiana mediante la regulación de los niveles de gas en el interior de los empaques, la reducción de la formación de condensaciones, o la integración de antimicrobianos o compuestos antioxidantes. En cuanto a estas posibilidades de conservación, uno de los aspectos con mayor oportunidad de mejora es en la integración del sistema de envasado en torno a las características específicas del producto a conservar, como etapa de maduración, procesos metabólicos, cantidad, potencial microbiano, etc., y también según las condiciones de almacenamiento (Gómez *et al.*, 2020; Herrera *et al.*, 2020). Cada producto tiene condiciones de conservación más favorables para extender la vida útil, como temperatura, humedad relativa, concentraciones de O_2, CO_2, etc. (Herrera *et al.*, 2020). Algunas de estas condiciones pueden ser controladas o al menos reguladas a un rango adecuado a través del propio sistema de empaque con la selección de materiales, disposición geométrica, mayor capacidad de transferencia de gas con perforaciones, cantidad de producto empaquetado e inclusión de elementos activos que controlan la humedad y minimizan la condensación (Belay *et al.*, 2018; Gaona-Forero *et al.*, 2018) o mejora la conservación de alguna otra manera. Mediante el uso de modelado y simulación e incluyendo todos los procesos de transferencia mencionados anteriormente, el sistema de empaque se puede optimizar para que se convierta en un empaque de atmósfera modificada en equilibrio (EMAP) con funciones activas (Agudelo-Rodríguez *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2018; Herrera *et al.*, 2020). Las funciones activas incluyen regular la humedad y la condensación durante el tiempo de almacenamiento esperado (tiempo de servicio) de acuerdo con la vida útil esperada del producto (Bovi *et al.*, 2018. Agudelo-Rodríguez *et al.*, 2020.). Asimismo, en esta metodología de configuración de empaques en torno al producto, también se debe considerar el impacto ambiental de los materiales de envasado una vez finalizado el tiempo de servicio (Bhargava *et al.*, 2020). Por tal motivo, es necesario incorporar materiales de empaque biodegradables en las propuestas de sistemas de empaque activo y EMAP que puedan cubrir las necesidades de conservación que se señalan anteriormente para frutas de interés como la uchuva (Black-Solís *et al.*, 2019; Perumal *et al.*, 2018). Considerando lo anterior, este estudio evaluó el efecto de diferentes sistemas de

envasado (dos de ellos biodegradables) sobre la calidad y vida útil de frutos frescos de uchuva en condiciones de refrigeración.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Material vegetal

Se obtuvieron frutos de uchuva *(Physalis peruviana* L., cv. Colombia) de cultivadores locales ubicados en el municipio de Ventaquemada, Departamento de Boyacá (Colombia). Los frutos fueron cosechados y luego transportados al Laboratorio Poscosecha de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá, Colombia). Inicialmente, se eliminó el cáliz en todas las muestras, y se seleccionaron frutos de maduración intermedia (etapas 3/4 de 6 correspondientes a frutos en transición a naranja claro) y sin evidencia visible de daños, deterioro microbiano o rajaduras (Garavito *et al.,* 2021). Posteriormente se realizó limpieza y desinfección de los frutos con una solución de hipoclorito de sodio de 1 g kg^{-1} para 60 s y lavada con agua potable. Finalmente, las muestras se dejaron secar a temperatura ambiente durante 2 horas a 17 °C para eliminar el agua superficial.

3.2.2 Materiales de embalaje

Se evaluaron tres tipos de empaque configurados con bandejas rectangulares rígidas selladas en la parte superior con películas flexibles: 1) embalaje PP/PET: bandeja de PET (Alico SA, Bogotá, Colombia) de 123 x 140 x 50 mm, y 0,234 ± 0,030 mm de espesor; Película PP fundido (Becopack Comercializadora, Bogotá, Colombia) 0,025 ± 0,010 mm de espesor. 2) Embalaje PLA/PLA: bandeja PLA (Envaseko, Areso, España) de 180 x 120 x 50 mm y 0,232 ± 0,020 mm de espesor; Película PLA (ClearBags, El Dorado Hills, CA, EE. UU.) 0,035 ± 0,020 mm de espesor. 3) Embalaje Cel/Cel: bandeja de celulosa (Envaseko, Areso, España) de 110 x 140 x 48 mm y 0,524 ± 0,020 mm de espesor; película de celulosa (Cepedano S.L., Villadangos del Páramo, España) 0,032 ± 0,020 mm de espesor.

3.2.3 Caracterización de los materiales de empaque

Espesor. El espesor de las bandejas de embalaje y las películas de prueba se determinó con un micrómetro digital Mitutoyo® Digimatic IP65 (Mitutoyo, Kawasaki, Japón) midiendo en tres puntos diferentes de la muestra y registrando el valor medio.

Permeabilidad. En las bandejas, dado su mayor espesor, la permeabilidad al gas se consideró insignificante. En las películas, los coeficientes de permeabilidad a O_2, CO_2 y vapor de agua se estimaron como se describe a continuación:

El coeficiente de permeabilidad al O2 se determinó mediante un método estático (Larsen y Liland, 2013; Papiernik et al., 2002) usando una celda de permeación de acero inoxidable de 7.8 cm de diámetro y con un área de permeación de 48 cm^2. La película de prueba se dejó en contacto con el espacio de cabeza de la celda por una cara y en contacto con aire atmosférico por la otra. En la prueba, inicialmente la celda fue cargada con N_2 puro eliminando todo el O_2 remanente. Luego se permitió la permeación de O_2 desde el aire atmosférico hacia el interior de la celda registrando el aumento en la concentración de O_2 con respecto al tiempo y se estimó la velocidad de permeación de O_2, OTR (en $cm^3\ m^{-2}\ d^{-1}$) luego de alcanzar una velocidad de ganancia de O_2 constante. La concentración de O_2 se midió con un analizador OpTech-O_2 Modelo P (MOCON - AMETEK, MN, USA). A partir de la OTR se calculó el coeficiente de permeabilidad de cada material (en $cm^3\ mm\ m^{-2}\ d^{-1}\ atm^{-1}$) conociendo el espesor y área de permeación de la película.

El coeficiente de permeabilidad al CO2 también se determinó a través del método de Larsen y Liland, (2013), utilizando la misma celda descrita anteriormente. En la prueba, inicialmente la celda fue cargada con CO_2 puro eliminando todo el aire remanente. Luego se permitió la permeación de CO_2 desde el interior de la celda hacia el aire atmosférico externo registrando la disminución en la concentración de CO_2 con respecto al tiempo y se estimó la velocidad de permeación de CO_2, CO_2TR (en $cm^3\ m^{-2}\ d^{-1}$) luego de alcanzar una velocidad de pérdida de CO_2 constante. A partir de la CO_2TR se calculó el coeficiente de permeabilidad de cada material.

El coeficiente de permeabilidad al vapor de agua se determinó mediante un método de pérdida de peso gravimétrico (Castellanos *et al*., 2016). 6 ± 0,05 g de agua líquida se introdujo en una celda cilíndrica de aluminio de 35 mm de diámetro y con un área de permeación de 0,00096m^2. La pérdida de peso del agua evaporada se registró hasta alcanzar una tasa de pérdida constante, y se midió la velocidad de transmisión de vapor de agua (en $g\ m^{-2}\ d^{-1}$) para luego calcular el coeficiente de permeabilidad de cada material (en $g\ mm\ m^{-2}\ kPa^{-1}d^{-1}$) conociendo previamente el espesor y área de permeación de la película.

Las pruebas de permeación se llevaron a cabo a 6,0 °C, 25,0 °C y 38,0 °C ± 0,5 °C y 75 ± 1% HR, durante el ensayo se mantuvieron las celdas en una cámara con control de temperatura y humedad relativa regulada a través de un sensor de humedad capacitivo con un control de microprocesador activo para humidificación y deshumidificación, y un sistema de autodiagnóstico para alcanzar rápidamente la humedad parametrizada. Para mantener una baja variación de temperatura y HR, la cámara solo se abrió durante 2-3 s para cada medición. Todas las pruebas se hicieron en triplicado. A partir de los valores obtenidos se calcularon los parámetros de la ecuación de Arrhenius, coeficiente de permeabilidad de referencia a 23 °C, *Qref* y energía de activación, Ea.

Propiedades mecánicas y térmicas. Para las películas se determinaron las propiedades mecánicas y térmicas. Las propiedades tensión y elongación fueron medidas en un texturómetro TA, XT2 (Texture Technologies Corp., Scarsdale, NY, USA). Se determinaron la fuerza de tensión y elongación hasta la ruptura de la película usando el accesorio A/TG. Las muestras fueron troqueladas en forma de corbatín y acondicionadas por 48 horas a 20 ± 0,1 ºC y 50 ± 1 % de humedad relativa. La separación inicial de las pinzas fue de 10 cm, la velocidad antes de la prueba de 5 mm s-1, durante la prueba de 3 mm s-1 y una velocidad después de la prueba de 10 mm s-1. Las propiedades mecánicas de tensión y elongación de las películas se determinaron de acuerdo con el método de prueba estándar ASTM D638.10694. Las temperaturas de transición vítrea, las entalpías de fusión y cristalización se determinaron utilizando calorimetría diferencial de barrido (DSC) en un calorímetro modelo 131 EVO (Setaram Inc., Caluire, Francia), con un crisol de aluminio y un muestra de 10 ± 2 mg, operada siguiendo el método de prueba estándar ASTM D3418-12.

3.2.4 Modelamiento de la transferencia de gases a través de las películas

Para mantener la calidad y prolongar la vida útil de un producto fresco, es necesario configurar adecuadamente el sistema de empaque (Herrera *et al.,* 2020), garantizando el intercambio adecuado de gases y teniendo en cuenta la respiración, transpiración y pérdida de peso del producto y la permeación de los materiales (Agudelo-Rodríguez *et al.,* 2020). Esta configuración se obtiene estableciendo los balances de masa para O_2, CO_2, vapor de agua y N_2 en función de todos los procesos mencionados anteriormente. En este estudio los diferentes

procesos de transferencia de gases para los frutos de uchuva y el empaque fueron representados a partir de las ecuaciones de balance de materia.

Ecuaciones de equilibrio de gas en el sistema de empaque. En el espacio de la cabeza de un empaque o envase, el cambio en las concentraciones de O_2, CO_2, H_2O y N_2 se puede representar utilizando las ecuaciones de balance de masa para cada gas. En las ecuaciones, es necesario considerar el consumo de O_2 y las tasas de producción de CO_2 (respiración) y la evaporación del agua (transpiración) del fruto, la permeación del gas a través de las paredes del empaque y las perforaciones en él, y los cambios en el volumen o la presión (Castellanos *et al.,* 2016; Xanthopoulos *et al.,* 2012). La velocidad de transferencia de gas a través de las perforaciones (K_{TR}) es una función del tamaño y el número de perforaciones en el empaque. Por el contrario, la permeación de gases a través del empaque será una función de los coeficientes de permeabilidad del material(Q), espesor de la pared (L), área de transferencia (A) y presión del sistema (P). Para un sistema de empaqué rígido con volumen constante y con cambios de presión insignificantes, las ecuaciones de equilibrio de masa en fracción de molar se pueden escribir de la siguiente manera para O_2 (ecuación 3.1) y CO_2 (ecuación 3.2) (Gaona *et al.,* 2018):

Para O_2,

$$V\frac{dy_{O_2}}{dt} = \left(K_{TRO_2} + \frac{APQ_{O_2}}{L}\right)\left(y_{O_{2}Out} - y_{O_2}\right) - r_{O_2}W \quad (3.1)$$

Para CO_2,

$$V\frac{dy_{CO_2}}{dt} = \left(K_{TRCO_2} + \frac{APQ_{CO_2}}{L}\right)\left(y_{CO_{2}Out} - y_{CO_2}\right) + r_{CO_2}W \quad (3.2)$$

Suponiendo que la atmósfera en el espacio de cabeza del empaque sea similar a la del aire externo, si la atmósfera del espacio de la cabeza no está saturada y si la actividad del agua en el espacio de la cabeza (HR/100) es menor que la actividad de agua de la fruta (a_{wf}), el balance para H_2O es,

$$\mathrm{V}\frac{\mathrm{dy_{H_2O}}}{\mathrm{dt}} = \left(\mathrm{K_{TRH_2O}} + \frac{\mathrm{APQ_{H_2O}}}{\mathrm{L}}\right)\left(\mathrm{y_{H_2O_{out}}} - \mathrm{y_{H_2O}}\right) + \mathrm{Wr_{H_2O}} \quad (3.3)$$

En las ecuaciones 3.1 a 3.3, yO_2, yCO_2, yH_2O son las fracciones molares de O_2, CO_2, y vapor de agua, respectivamente; yO_{2out}, yCO_{2out}, yH_2O_{out} y yN_{2out} son las fracciones molares externas, V es el volumen del espacio de cabeza (cm^3), W es el peso de la fruta (kg) y t es el tiempo de almacenamiento (días). Si la atmósfera del espacio de la cabeza está saturada (HR = 100 %) a continuación, $dyH_2O/dt = 0$. En este caso, el agua evaporada en el producto se condensará inmediatamente dentro del empaque (Castellanos *et al.,* 2016). El restante corresponde a N_2 y se obtiene teniendo en cuenta que la suma de fracciones molares de los gases del espacio de cabeza debe ser igual a 1.

Las tasas de permeación de cada gas a través de las perforaciones en los empaques (K_{TRO2}, $K_{TR}CO_2$ y $K_TH_{R2}O$ en $cm^3\ d^{-1}$) se estimaron a partir de estudios anteriores (Agudelo-Rodríguez *et al.,* 2020; Herrera *et al.,* 2020). Los coeficientes de permeabilidad de cada gas para las películas evaluadas (QO_2, QCO_2 y QH_2O) se obtuvieron como se indicó anteriormente en la metodología.

Las tasas de respiración (consumo de O_2, rO_2 y producción de CO_2, rCO_2) y transpiración (evaporación del agua, rH_2O) se estimaron en el capítulo 2. La tasa de respiración en los frutos se representó con la cinética enzimática Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva por CO_2 (MMA). Asimismo, la dependencia de la temperatura se incorporó a la cinética de respiración estableciendo el cambio de los parámetros de la MMA usando la ecuación de Arrhenius (Castellanos *et al.,* 2016). La tasa de transpiración de los frutos se representó a través del modelo combinado que incorpora la transferencia de humedad debido a la diferencia en la actividad del agua entre la fruta y la atmósfera y debido a la disipación del calor respiratorio (dependiente de la frecuencia de respiración). En este caso, la influencia de la temperatura en la transpiración se incluyó en los cambios de la tasa de respiración y representando el cambio en la transferencia de vapor de agua dependiendo de la temperatura con la ecuación de Arrhenius (Capitulo 2, sección 2.3.8). La pérdida de peso del producto empacado se representó en función de la tasa de transpiración (rH_2O) de la siguiente manera:

$$\frac{dW}{dt} = -Wr_{H_2O} \quad (3.4)$$

La integración numérica de ecuaciones 3.1 a 3.4 se realizó mediante el uso del software Matlab® (MathWorks, Inc., Natick, MA, EE. UU.) para obtener los cambios estimados en los

niveles de gas y la pérdida de peso de la fruta después de definir los parámetros de configuración del embalaje, el tiempo de almacenamiento y condiciones como la temperatura (Agudelo-Rodríguez *et al.*, 2020; Herrera *et al.*, 2020). La idoneidad de los empaques se verificó a partir de estos datos simulados para obtener un sistema EMAP favorable para la fruta.

3.2.5 Configuración y diseño experimental de la prueba de almacenamiento

Para evaluar el efecto del material de empaque en la calidad y vida útil de los frutos de uchuva inicialmente se empacaron 100.0 ± 1.0 g de frutas en bandejas del PP/PET, PLA/PLA y celulosa/celulosa. Una vez que los frutos fueron pesados, se introdujeron en cada bandeja, y luego la película fue sellada térmicamente en la parte superior para crear un empaque con atmósfera modificada (MAP) (Figura 3.1). En cada uno de los empaques se hizo una única perforación en la película de la parte superior de 0.058 ± 0.002 mm con una aguja delgada (tamaño disponible más pequeño) para garantizar la capacidad de transferencia suficiente y alcanzar niveles favorables de equilibrio O_2 en el sistema EMAP y evitar el agotamiento de O_2 en el interior (Castellanos *et al.*, 2016).

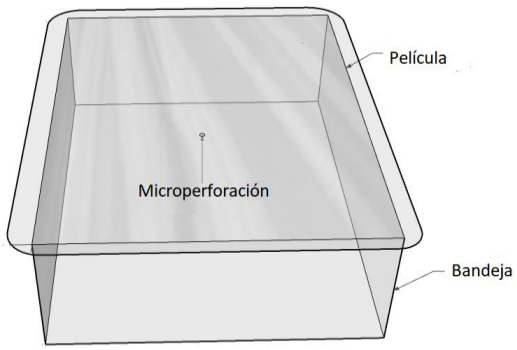


Figura 3.1 Prototipo de empaque EMAP para frutos de uchuvas
Fuente: Autor

El cambio en la concentración de O_2 y CO_2 fue simulado previamente utilizando el modelo de transferencia de gases propuesto a anteriormente (literal 3.3.4) para asegurar que las concentraciones estuvieran en un rango favorable para la preservación de los frutos. Como

control para el ensayo de empaque y almacenamiento se ubicaron frutos con el mismo peso en bandejas de PET abiertas (sin película en la parte superior).

Los diferentes empaques fueron almacenados en una cámara climática C240 (Insak SAS, Bogotá, Colombia) a 6,0 ± 0,5 °C y 75 ± 2% HR durante seis semanas midiendo la evolución de las concentraciones de O_2 y CO_2 en el espacio de cabeza del envase, la calidad visual, pérdida de peso, color, firmeza, actividad del agua, sólidos solubles totales (% SST) y acidez titulable (%ATT) de los frutos una vez a la semana hasta el deterioro de las muestras. La concentración de O_2 y CO_2 dentro de los empaques se evaluó tomando una muestra de gas de 5 cm^3 desde el interior de las bandejas selladas con un analizador Dansensor CheckPoint 3S Premium (Mocon Ametek, EE. UU.). Posteriormente, se hizo una comparación de las concentraciones medidas con los valores estimados del modelo de transferencia de gas.

3.2.6 Evaluación de las propiedades de calidad de los frutos de uchuva durante almacenamiento refrigerado

Aceptabilidad visual. Se estimó sobre la base de una evaluación de la presencia de microorganismos y/o deterioro teniendo en cuenta el número de frutas con contaminación fúngica, o que presentaba podredumbre respecto al número total de frutas en el empaque (Hernández-Muñoz *et al.*, 2006; Sierra *et al.*, 2019). Cuando el número de frutas con evidencia de contaminación o deterioro fue superior al 20% el tratamiento se terminó, y los frutos fueron desechados. Este fue el criterio de la vida útil (Pérez *et al.*, 2020).

Pérdida de peso. El cambio en el peso de la fruta se midió utilizando una balanza analítica Ohaus PA-3102 (OHAUS Corp. Pine Brook, NJ, EE. UU.), con una precisión de ± 0,01 g (Olivares-Tenorio et al., 2017).

Color. El color de los frutos se midió en el centro del área ecuatorial del fruto, se realizó utilizando un colorímetro CR-331 modelo Minolta (Minolta Camera Co., Osaka, Japón) e informando de las coordenadas de color CIELAB L*, a* y b*. " "Daylight 65" fue considerado como el iluminador estándar y para cada medición se llevaron a cabo tres repeticiones, informando del valor medio de cada repetición (Jha, 2010; Oliveira et al., 2016).

Firmeza. Se midió en el área ecuatorial de la fruta (sometida a punción transversal) utilizando una máquina de ensayo universal LLOYD® LS 1 (Ametek Inc., Berwyn, PA, EE. UU.) con una sonda de punta plana de 2 mm a una fuerza de precarga de 1 N y una velocidad de prueba de 2 mm s^{-1}. La firmeza se tomó como la fuerza máxima (N) necesaria para penetrar el fruto a una profundidad de 5 mm (Balaguera López *et al*., 2015).

a_w. La actividad de agua se determinó en un analizador Hygrolab C1 (Rotronic AG, Bassersdorf, Suiza) tomando medidas de una mezcla de pulpa de fruta y cáscara. Para ello, se colocó una muestra de fruta en una cápsula de 10 cm^3, y esto fue analizado con la sonda después de que la actividad del agua (humedad relativa) en el espacio de la cabeza de la cápsula alcanzó el equilibrio con la actividad de agua de la muestra (Zhang *et al.,* 2017).

Solidos solubles totales (**SST % w/w).** Se midieron en el jugo de fruta utilizando un refractómetro Hanna HI 968011 (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA), expresando el resultado en °Brix.

Acidez titulable (ATT %). Se determinó en el jugo de fruta y se expresó como % de ácido cítrico. Se utilizó un titulador automático Metrohm 916 Ti-Touch (Metrohm AG, Herisau, Suiza), el cual también determinó pH de la muestra antes de iniciar la titulación. Se valoraron 30 ml de jugo con una solución estandarizada 0.1 N NaOH (Sigma-Aldrich, Dublín, Irlanda) a un punto final de pH 8.1. Todos los análisis se realizaron en triplicado, informando del valor promedio y la desviación estándar (Lanchero *et al*., 2007; Yıldız *et al*., 2015).

Basándose en los cambios en las propiedades de calidad descritas anteriormente, se determinó el sistema de empaque con el mejor rendimiento para la preservación de las frutas de uchuva.

3.2.7 Análisis estadístico

Las diferencias entre las configuraciones de empaque se establecieron comparando los valores medidos de las propiedades de calidad en los frutos empacados realizando un análisis de la varianza (ANOVA) y determinando las diferencias significativas entre las configuraciones ($p < 0.05$) utilizando la prueba LSD de Fisher del Software StatGraphics Centurion XVIII.

3.3 Resultados

3.3.1 Permeabilidad y propiedades de los materiales de embalaje

La Tabla 3.1 muestra los parámetros de Arrhenius estimados experimentalmente (energías de activación y coeficientes de permeabilidad a 23 °C) de O_2, CO_2 y vapor de agua obtenido para las películas PLA, celulosa y PP. Del mismo modo, los coeficientes de permeabilidad estimados a 6 °C para los tres gases en las películas. Se evidenció que la permeabilidad a O_2 y CO_2 era significativamente menor para la celulosa en comparación con las películas del PP y PLA (siendo este último el material más permeable). De lo contrario, para la permeabilidad del vapor de agua, se obtuvo el valor más alto en la película de celulosa, seguido del PLA, mientras que el PP fue aproximadamente 10 veces inferior (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Coeficientes de permeabilidad calculados a 6 °C utilizando la ecuación de Arrhenius. Desviación estándar (DE) incluida para n = 4.

Parámetros de permeabilidad	**Ácido poliláctico (PLA)**	**Celulosa (Cel)**	**Polipropileno (PP)**
O_2			
Ea (kJ mol^{-1})	72,088±7,270	23,955±2,774	41,234±4,029
Qref at 23 °C (cm^3 mm m^{-2} kPa^{-1} d^{-1})	1,266±0,125	0,079±0,009	1,112±0,109
Q a 6 °C (cm^3 mm m^{-2} kPa^{-1} d^{-1}) *	0,213	0,043	0,401
CO_2			
Ea (kJ mol^{-1})	65,844±2,381	19,436±0,301	14,593±1,202
Qref at 23 °C (cm^3 mm m^{-2} kPa^{-1} d^{-1})	0,851±0.031	0,015±0,001	1,792±0,148
Q a 6 °C (cm^3 mm m^{-2} kPa^{-1} d^{-1}) *	0,167	0,009	1,249
Vapor de agua			
Ea (kJ mol^{-1})	24,138±1,064	38,898±3,097	3,217±0,221
Qref at 23 °C (g mm m^{-2} kPa^{-1} d^{-1})	2,033±0.090	3.899±0,550	0,103±0,007
Q a 6 °C (g mm m^{-2} kPa^{-1} d^{-1}) *	1,119	1,490	0,096

Coeficientes de permeabilidad calculados a 6 °C utilizando la ecuación de Arrhenius. Desviación estándar (DE) incluida para n = 4.

En cuanto al efecto de la temperatura, los coeficientes de permeabilidad O_2 y CO_2 en PLA y el coeficiente de permeabilidad del vapor de agua en celulosa tuvieron la mayor dependencia (energías de activación más altas). En el caso de la celulosa, los resultados obtenidos pueden deberse a la alta densidad molecular en las fibras de este material que resulta en una alta resistencia a la difusión de gases (Yang *et al.,* 2011). Por otro lado, debido a su naturaleza hidrófila y mayor afinidad química por el agua, su permeabilidad al vapor de agua es mayor, seguida por el PLA, también hidrófilo, cuya permeabilidad al vapor de agua es del mismo orden, aunque algo menor.

La determinación de las propiedades mecánicas de las películas mostró diferencias estadísticamente significativas entre las de naturaleza biodegradable (PLA y celulosa) y la película plástica (PP). La elongación para PLA fue de un 333,402 ± 3,930% y para celulosa de un 337,060 ± 2,560%, mientras que la película del PP alcanzó el 598,670 ± 3,070 %. La resistencia a la tensión también fue mayor en la película del PP (74,040 ± 8,901 MPa) frente a la de PLA y celulosa, cuyos valores fueron de 22,541 ± 3,260 y 28,481 ± 6,793 MPa respectivamente. Sin embargo, aunque dichas propiedades son un indicador de la capacidad de protección que otorgará a los frutos y la resistencia a daños mecánicos (Moncayo Martínez, 2013; Sothornvit y Krochta, 2005), se puede inferir que las películas biodegradables se encuentran en un margen aceptable y justificable ambientalmente, dada la capacidad de descomposición en cortos periodos (Quiroga, 2011).

En cuanto al análisis térmico, el PLA tuvo temperaturas máximas de fusión y cristalización de 172,42 °C ± 0,001 °C y 115,5 °C ± 0,005 °C, como particularidad se observó un pico previo de fusión a 163,5± 0,001 °C atribuible a la recuperación de humedad por la naturaleza hidrofílica. El PP tuvo temperaturas de 160,0 °C ± 0,001 °C y 119,5 °C ± 0,003 °C, respectivamente. La celulosa tuvo dos eventos endotérmicos que se presumen como procesos de fusión, con una temperatura máxima de fusión de 108,8 °C± 0,001 °C y 235°C+± 0,002 °C, pero no se observó una temperatura cristalización. Se presume que la evaporación no concluyente del material puede estar relacionada con su naturaleza hidrófila; ya que, si hay un proceso de fusión dentro de la molécula, este se superpone estrechamente con la pérdida de agua sin ser capaz de diferenciarse entre ellos. Por otra parte, una ventaja de los materiales biodegradables como el PLA está dada por un gasto energético menor durante el procesamiento derivado de un calor

específico más bajo y la estructura amorfa del polímero en comparación con los de naturaleza plástica que requieren de más calor para elevar su temperatura (Quiroga, 2011).

3.3.2 Comportamiento de las concentraciones de gases en los empaques

Como se mencionó en la metodología, para los diferentes tratamientos de empaque (PLA/PLA, PP/PET y Cel/Cel) se verificaron previamente los niveles predichos de O_2, CO_2 y HR a partir de la simulación efectuada con el modelo de transferencia de gases en el empaque activo, cada uno de acuerdo con sus dimensiones y capacidad de permeación de gases y la perforación realizada. A partir de lo anterior, se hizo el seguimiento experimental para verificar los niveles reales de gases y evaluar los cambios de calidad.

En todos los empaques se logró un EMAP eficaz (Figura 3.2), reduciendo la concentración O_2 y un aumento en la concentración de CO_2 hasta alcanzar niveles aproximadamente constantes entre el día 8 y el día 25 de almacenamiento. La Figura 3.2 muestra las concentraciones predichas de O_2 y CO_2 en el espacio de cabeza (líneas) para los empaques evaluados y los resultados experimentales observados (símbolos geométricos), los cuales estuvieron satisfactoriamente cerca de los valores predichos (R^2_{adj} = 0,905 para CO_2 y 0,912 para O_2).

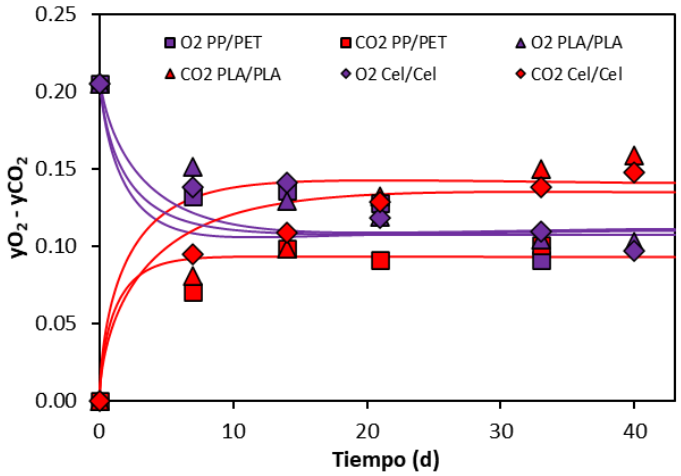


Figura 3.2 Concentración de O_2 y CO_2 experimental (símbolos) y predicha (líneas) en los sistemas de empaque del PP/PET, PLA/PLA y Celulosa/Celulosa con frutos de uchuva a 6 °C y 75 % HR. Desviación estándar incluida para n = 3.

Sin embargo, dicho equilibrio se alcanzó de manera más rápida (día 7) en los empaques PP-PET dada la diferencia en los coeficientes de permeabilidad, que en este caso son más altos con respecto a las películas de carácter biodegradable (PLA y Cel), los cuales alcanzaron el equilibrio cerca al día 14 de almacenamiento. De acuerdo con Ospina *et al.*, (2008); Pinto *et al.*, (2016) y Soleno (2017), esta afirmación es consistente ya que el equilibrio se establece cuando la transmisión de gases se iguala con la intensidad respiratoria del producto y ello depende directamente de la capacidad de permeación de la película. Por otra parte, los niveles de oxígeno y dióxido de carbono estabilizaron cerca al 0.1 fracción en todos los empaques, siendo este un nivel aceptable que disminuye la intensidad respiratoria del fruto y retrasa la maduración, sin inducir anaerobiosis (O_2 <0.025 fracción molar) y/o procesos fermentativos en el empaque (Carrillo, 2004).

Es importante resaltar que los niveles equilibrio de CO_2 dentro de los empaques biodegradables fueron mayores (0.13-0.15) a los de alcanzados por la película del PP (0.09), ubicándose en el margen tolerable recomendado para frutos, ya concentraciones más altas pueden producir malos olores derivados de una producción de etano y etanol (Carrillo, 2004). En este caso, el fruto empacado tuvo una buena tolerancia al CO_2 el cual ejerce un efecto inhibidor sobre el crecimiento bacteriano y fúngico que se incrementa a bajas temperaturas debido al aumento de su solubilidad. Paralelamente la disminución de las concentraciones de oxígeno se encargó de ralentizar los procesos de maduración (Hernández 2003 y Ospina *et al.*, 2008). Finalmente, para los días 35 a 40 de almacenamiento el ligero incremento de CO_2 en los empaques pudo estar vinculado a la fase de senescencia en la cual empiezan los ataques por agentes microbianos como el hongo *Botrytis cinerea* característico en frutos de uchuva (Ávila *et al.*, 2006).

3.3.3 Evaluación de propiedades de calidad de la uchuva durante el almacenamiento

La Figura 3.3 muestra la pérdida de peso de la fruta durante el almacenamiento en los diferentes empaques. Las muestras almacenadas sin embalaje (control) pierden peso a un ritmo superior que aquellas almacenadas en las bandejas termoselladas con las películas. Para el día 21 los frutos de control presentaron marchitamiento con una pérdida de peso de 13,4 %, mientras que los frutos en los empaques sellados permanecían por debajo del 5% de perdida.

En este caso las películas constituyen una barrera para el transporte de humedad, restringiendo la tasa de transpiración de la fruta debido al aumento de HR en el EMAP (Castellanos *et al.*, 2016; Lanchero *et al.*, 2007). Esta dinámica está directamente relacionada con el coeficiente de permeabilidad del vapor de agua de la película utilizada en las bandejas selladas. En este caso, las bandejas PP/PET presentan pérdidas significativamente menores (<2%) en comparación con los empaques de PLA y celulosa que rondaban el 7% para el día 40, atribuible al carácter hidrófilo y a la mayor capacidad de transmisión de películas biodegradables (Barghava *et al.*, 2020).

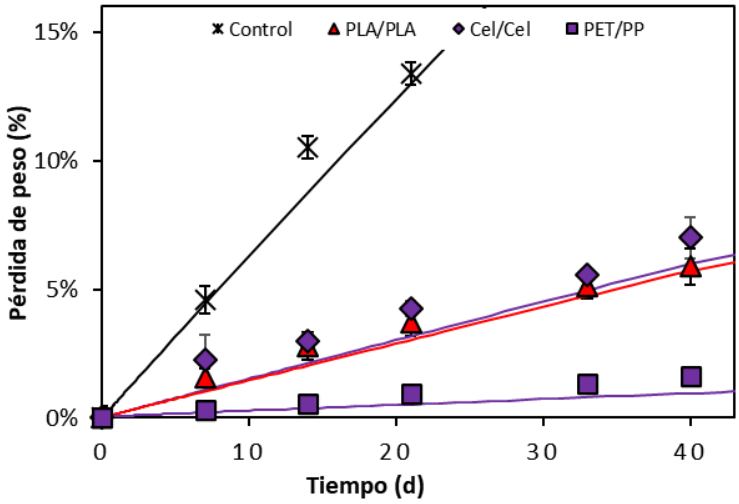


Figura 3.3 Pérdida de peso acumulada (símbolos) y predicha (líneas) en los sistemas de empaque del PP/PET, PLA/PLA, Celulosa/Celulosa y control para frutos de uchuva a 6 °C y 75 % HR. Desviación estándar incluida para n = 3.

La condensación de agua en los en los empaques biodegradables de celulosa y PLA fue escasa (0,320 y 0,391 g para el día 40, respectivamente) teniendo en cuenta que no se evidenció empañamiento en la superficie, ni acumulación de líquido en el fondo del recipiente, factor importante que puede propiciar el crecimiento de microorganismos y en consecuencia acelerar el deterioro del fruto (Gutiérrez *et al.*, 2011). En las bandejas PP/PET se observó la condensación más alta (1,1 g en el día 33), visible en pequeñas gotas en la cara interior de la película del PP desde el día 21 de almacenamiento (Figura 3.4). La condensación fue consecuencia de la saturación del espacio de cabeza del embalaje debido a una mayor tasa de transpiración en comparación con la velocidad de transmisión de vapor de agua fuera del empaque (Gómez *et al.*, 2020).

Figura 3.4 Condensación de agua en la superficie de película de empaque PP/PET

La Tabla 3.2 muestra la evolución de las características fisicoquímicas de los frutos de uchuva almacenados bajo las diferentes condiciones de empaque. Para los valores a_w, se encontraron diferencias significativas entre los frutos empacados con EMAP y los de control, con una reducción más significativa de a_w en este último, que coincide con la pérdida de peso mencionada anteriormente. Entre los empaques, se observó una disminución gradual del a_w con valores cercanos al 0,9 al final de la prueba, derivada de la pérdida de agua libre del fruto en el proceso de transpiración. En cuanto a la concentración de sólidos solubles en los frutos almacenados sin embalaje (control) tuvo un aumento significativamente más rápido en comparación con las frutas en empaques. Este aumento del %SST está relacionado con los procesos de maduración y degradación de los frutos, con la hidrólisis del almidón, el aumento de la concentración de azúcar y el consumo de ácidos orgánicos (Lanchero *et al.,* 2007). En los frutos empacados, los niveles más altos de CO_2 y los niveles más bajos de O_2 en comparación con el aire produjeron una disminución en los procesos de maduración y senescencia (Gómez *et al.,* 2020).

En los cambios en el pH del fruto se observaron valores aproximadamente constantes (3.99-4.04) para todos los frutos almacenados, con un ligero aumento el día 40 para las bandejas de PLA y celulosa (4.06-4.21). El ensayo mostró que el ascenso de pH fue significativamente más lento en los frutos empacados bajo PP-PET y se estabilizó en un valor más bajo que en el control y los empaques biodegradables, aunque a partir del día 33 estas diferencias ya no fueron

estadísticamente significativas. Los ascensos lentos de pH están vinculados a bajas tasas de O_2 en el empaque que disminuyen los cambios propios de una maduración normal y por lo tanto garantizan la estabilidad en periodos de almacenamiento más largos que en una atmósfera sin control (Hernández, 2003).

En cuanto a la acidez, se observó una reducción sostenida durante todo el período de almacenamiento de todos los tratamientos sin mostrar diferencias claras entre ellos, aunque hubo una mayor tasa decreciente de acidez para los frutos de control. Esto puede vincularse a la menor tasa de respiración en los sistemas EMAP. Los valores de pH y acidez estaban dentro de las gamas características poscosecha para frutos de uchuva (Balaguera López *et al.,* 2012; Olivares-Tenorio *et al.,* 2017), lo que indica una conservación favorable en los empaques sellados independientemente del material utilizado en el empaque.

Tabla 3.2 Evolución de las propiedades de calidad de los frutos de uchuva bajo diferentes condiciones de empaque a 6 °C y 75 % HR

Propiedad	Empaque	Día 0	Día 14	Día 21	Día 33	Día 40
a_w	**Control**	0.95±0.03^{a}	0.90±0.03^{Ab}	0.87±0.01^{Ab}		
	PET/PP	-	0.90±0.03^{Aa}	0.92±0.01^{Ba}	0.92±0.01^{Ba}	
	PLA/PLA	-	0.92±0.01^{ABcb}	0.94±0.00^{Bba}	0.90±0.01^{Acd}	0.89±0.00^{Ad}
	Cel/Cel	-	0.94±0.02^{Ca}	0.94±0.00^{Ba}	0.93±0.00^{Bab}	0.92±0.01^{Bb}
SST (%)	**Control**	12.40±0.62^{a}	12.67±0.21^{Aa}	15.37±0.15^{Ab}		
	PET/PP	-	13.23±0.15^{Bb}	13.47±0.15^{Bc}	13.60±0.20^{Ac}	
	PLA/PLA	-	13.20±0.17^{Bb}	13.30±0.17^{Cb}	13.43±0.15^{Acd}	13.60±0.20^{Ad}
	Cel/Cel	-	13.27±0.15^{Bb}	13.40±0.10^{Bbc}	13.67±0.21^{Ac}	14.23±0.47^{Bd}
pH	**Control**	3.77±0.01^{a}	4.00±0.04^{Ab}	4.07±0.01^{Ac}		
	PET/PP	-	3.93±0.04^{Bb}	3.99±0.01^{Cc}	3.99±0.01^{Ac}	
	PLA/PLA	-	4.05±0.02^{Ab}	4.06±0.00^{Ab}	4.06±0.04^{Ab}	4.17±0.12^{Ab}
	Cel/Cel	-	4.03±0.01^{Ab}	4.03±0.02^{Bb}	4.04±0.07^{Ab}	4.06±0.02^{Ac}
ATT (%)	**Control**	2.39±0.12^{a}	2.24±0.09^{Aa}	1.94±0.05^{Ab}		
	PET/PP	-	2.19±0.06^{Aab}	1.97±0.07^{ABbc}	1.89±0.03^{Ac}	
	PLA/PLA	-	2.15±0.14^{Aab}	1.93±0.05 ^{Ab}	1.92±0.02^{Ab}	1.91±0.01^{Aab}

	Cel/Cel	-	2.09±0.03^{Ab}	2.05±0.04^{Bb}	2.00±0.01^{Bb}	1.84±0.04^{Bc}

Diferentes letras en mayúscula en la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos ($p<0,05$) usando la prueba LSD de Fisher. Letras diferentes en minúscula en la misma fila indican diferencias significativas entre los días de almacenamiento ($p<0,05$) usando la prueba LSD de Fisher. Desviación estándar incluida para n = 3.

En cuanto al color de los frutos, como se observa en la tabla 3.3, hubo una ligera disminución en el valor de luminosidad y la coordenada a* (a tonos menos rojos), mientras que hubo un ligero aumento en la coordenada b* (a tonos más amarillos). Esto ocurrió con mayor intensidad para los frutos de control, mientras que los cambios fueron más lentos en los frutos envasados sin observar diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 3.5).

Tabla 3.3 Evolución de las propiedades de color de los frutos de uchuva bajo diferentes condiciones de empaque a 6 °C y 75 % HR

Propiedad	Empaque	Día 0	Día 14	Día 21	Día 33	Día 40
Luminosidad (L*)	**Control**	**66.68±4.32 a**	**60.77±3.12 Ab**	**60.55±3.27Ab**		
	PET/PP	-	67.19±1.98Aa	64.59±3.33Aa	64.12±7.98Aa	
	PLA/PLA	-	66.90±2.62Aa	65.15±5.45Aa	64.91±1.81Aa	64.19±3.56Aa
	Cel/Cel	-	65.14±2.27Aa	62.23±4.55Aa	64.67±1.92Aa	63.98±2.65Aa
Coordenada de color (a*)	Control	5.55±9.87 a	15.32±2.44Ab	13.37±2.90AB b		
	PET/PP	-	12.84±4.81Ab	11.30±1.96Ab	10.40±3.88Bb	
	PLA/PLA	-	13.38±4.36Ab	12.63±3.36AB b	14.48±3.08Ac	12.51±3.56Ab
	Cel/Cel	-	12.25±5.16 Ab	13.18±3.52AB b	11.53±5.07Bb	11.80±2.83Ab
Coordenada de color (b*)	Control	44.15±16.09a	49.45±3.25Aa	50.48±5.13Aa		
	PET/PP		53.15±4.54Bb	50.80±3.18Ab	48.90±5.44Aa b	
	PLA/PLA		53.03±2.79Bb	51.38±4.11Ab	51.43±3.23AB b	52.68±2.27Ab
	Cel/Cel		51.83±3.00AB b	49.15±4.11Aab	49.19±2.90Aa b	58.65±3.89Bc

Diferentes letras en mayúscula en la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos($p<0,05$) usando la prueba LSD de Fisher. Letras diferentes en minúscula en la misma fila indican diferencias significativas entre los días de almacenamiento ($p<0,05$) usando la prueba LSD de Fisher. Desviación estándar incluida para n = 3.

Sin embargo, en los empaques PLA/PLA, la evolución del color en los frutos fue más estable con tonos amarillo-naranja durante todo el período de almacenamiento (Figura 3.5), lo que puede atribuirse a una adecuada composición de gases en el espacio de cabeza de embalaje que permite desenmascarar los carotenos de forma regulada y gradual (Balaguera López *et al.,* 2015). Durante la maduración, el fruto de uchuva realiza una transición de color de verde a naranja debido a la degradación de clorofilas y acumulación de carotenoides, principalmente β-caroteno, paralelo a este proceso, el fruto pierde firmeza (Gutiérrez, 2008 y Balaguera López *et al.*, 2015). El desarrollo de tonalidades amarillas (+b*) y rojizas (+a*) se acentuó todos los frutos empacados a través del tiempo correspondiendo a los cambios de maduración del fruto (Figura 3.5). En el final de la vida útil de los tratamientos el color naranja se intensificó, característico de estados de sobre madurez y procesos de senescencia del fruto (Galvis; Fischer; Gordillo, 2005).

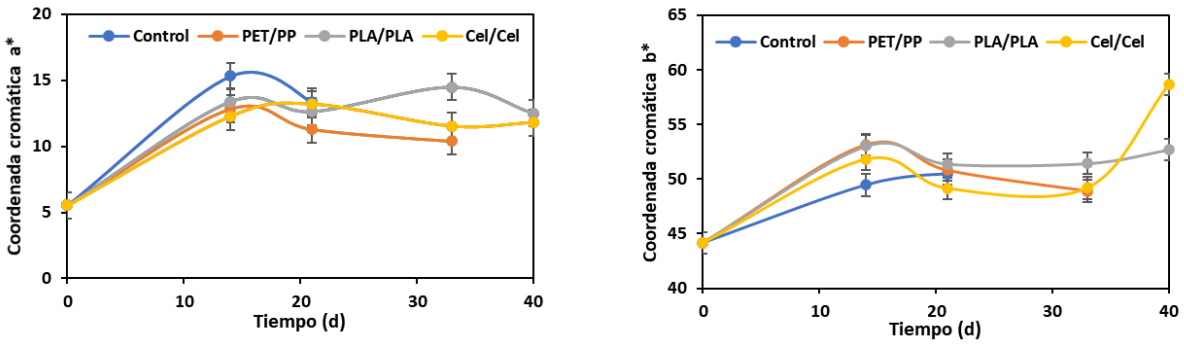


Figura 3.5 Evolución de coordenadas de color a* y b*

Finalmente, hubo una pérdida sostenida de firmeza para todos los frutos. Esto fue significativamente mayor para las muestras de control que las almacenadas en empaques, que permanecieron más firmes durante el almacenamiento y no mostraron diferencias significativas entre ellas. Sin embargo, una pérdida de firmeza ligeramente mayor se evidencia en las muestras PLA/PLA, posiblemente debido a una mayor deshidratación de la fruta en este tratamiento. En cualquier caso, los valores obtenidos pueden considerarse favorables para

todos los empaques evaluados ya que, durante los 40 días de pruebas, se mantuvieron similares a los reportados por Balaguera-López *et al.,* (2015) almacenadas durante 8 días a 20°C.

Tabla 3.4 Evolución de la firmeza de los frutos de uchuva bajo diferentes condiciones de empaque a 6 °C y 75 % HR

Propiedad	Empaque	Día 0	Día 14	Día 21	Día 33	Día 40
Firmeza (N)	Control	5.19±1.32 a	4.76±0.7Aa	2.92±0.70Ab		
	PET/PP	-	4.35±0.88Ab	4.36±0.72Bb	4.36±1.69Ab	
	PLA/PLA	-	4.22±0.61Ab	4.15±0.09Bb	3.89±0.45Ab	3.69±1.12Ac
	Cel/Cel	-	4.64±1.04Aa	4.54±1.43Ba	4.82±1.98Aa	4.10±1.24Aa

Diferentes letras en mayúscula en la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos($p<0,05$) usando la prueba LSD de Fisher. Letras diferentes en minúscula en la misma fila indican diferencias significativas entre los días de almacenamiento ($p<0,05$) usando la prueba LSD de Fisher. Desviación estándar incluida para n = 3.

3.3.4 Vida útil del fruto y sistema de empaque más adecuado

La vida útil de los frutos en el almacenamiento estuvo altamente relacionada con el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas previamente discutidas y el seguimiento visual realizado durante el tiempo de almacenamiento (Figura 3.5).

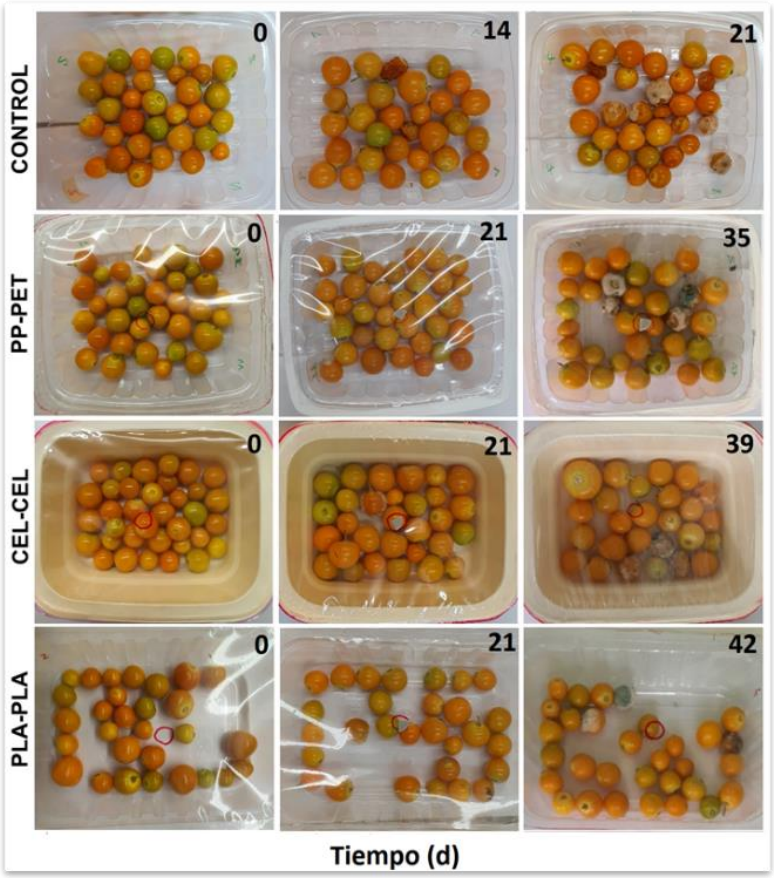


Figura 3.6 Seguimiento visual a los sistemas de empaque del PP/PET, PLA/PLA y Celulosa/Celulosa con frutos de uchuva almacenados a 6 °C y 75 % HR.

Los frutos de control almacenados en bandejas de PET abiertas sin ningún control atmosférico se deterioraron en aproximadamente la mitad del tiempo que los dispuestos en los empaques con EMAP (reducción en O_2 y aumento del CO_2), que, como ya se ha mencionado, reduce y ralentiza la frecuencia respiratoria, maduración y deterioro. En este caso, el uso de películas biodegradables como la celulosa y el PLA mostró un efecto positivo en la conservación de la fruta, permitiendo una duración de 39 y 42 días respectivamente, hasta evidencia de crecimiento fúngico y deterioro. Lo anterior se puede atribuir a mejores niveles de gas en el espacio de la cabeza, y menos condensación de agua en el interior de los empaques debido a los altos coeficientes de permeabilidad al vapor de agua. Para los paquetes PET/PP, la vida útil fue de 35 días con abundante crecimiento fúngico debido a la condensación de humedad dentro del paquete. Finalmente, los frutos de control sin empaque sólo duraron 21 días (Figura 3.6).

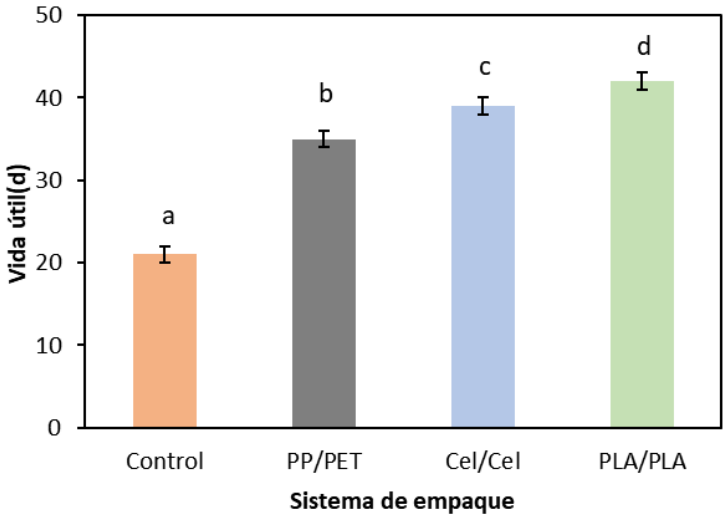


Figura 3.7 Vida útil de los frutos de uchuva en los sistemas de empaque del PP/PET, PLA/PLA, Celulosa/Celulosa y control a 6 °C y 75 % HR. Desviación estándar incluida para n = 3.

En este estudio, los empaques de PLA tenían las características más equilibradas para la mejor conservación de la fruta, con un EMAP eficaz con niveles favorables de O_2 y CO_2, baja condensación dentro del empaque, y una pérdida de peso aceptable. La vida útil obtenida en los frutos frescos empacados en sistemas a base de materiales biodegradables fue satisfactoria en comparación con la reportada por otros autores donde a través de la aplicación de atmósferas modificadas y/o tecnologías emergentes se lograron entre 33 y 38 días de vida útil en condiciones de almacenamiento similares (Guerrero *et al.*, 2012, Lanchero *et al.*, 2007 y Olivares-Tenorio *et al.*, 2017). Los sistemas de empaque propuestos se pueden mejorar incluyendo otras características activas como la adición de elementos para la adsorción de humedad, la liberación controlada de compuestos antifúngicos, antioxidantes o retardantes de maduración para aumentar aún más la vida útil de la fruta.

Por otra parte, es importante reconocer la viabilidad de los empaques de celulosa con los cuales se alcanzaron 39 días de vida útil, ya que estos resultan prometedores dada su capacidad compostable de menor exigencia respecto a las condiciones controladas para la biodegradabilidad (temperatura, humedad y luz) del PLA.

3.4 Conclusiones

Con el sistema PLA/PLA configurado se obtiene la vida útil más larga (42 días) en los frutos de uchuva en comparación con los empaques de celulosa con 39 días de vida útil, 35 días para PP/PET y 21 días para los frutos de control respectivamente.

El uso del modelo de transferencia de gas en el sistema de empaque fue altamente satisfactorio, lo que le permitió predecir con un alto grado de cercanía la concentración de O_2 y CO_2 en los sistemas EMAP y la pérdida de peso de las muestras.

Los empaques propuestos para este estudio fueron configurados específicamente para frutos de uchuva, analizando sus procesos metabólicos de respiración y transpiración. Las características y atributos de calidad del fruto se relacionaron con los materiales de empaque estableciendo así el comportamiento más favorable. Esta metodología se puede extender a otros productos frutales sensibles a daños mecánicos, deterioro enzimático, microbiano y altamente perecederos.

Referencias

Agudelo-Rodríguez, G., Moncayo-Martínez, D., y Castellanos, D. A. (2020). Evaluation of a predictive model to configure an active packaging with moisture adsorption for fresh tomato. Food Packaging and Shelf Life, 23, 100458. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100458

Balaguera-López, H.E., Martínez, C.A., y Herrera, A. (2015). Refrigeration affects the post-harvest behavior of 1-methylcyclopropene-treated cape gooseberry (Physalis peruviana L.) fruits with the calyx. Agronomía Colombiana, 33(3), 356–364. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n3.51896

Belay, Z.A., Caleb, O.J., Mahajan, P.V., y Opara, U.L. (2018). Design of active modified atmosphere and humidity packaging (MAHP) for 'wonderful 'pomegranate arils. Food and Bioprocess Technology, 11(8), 1478-1494. https://doi.org/10.1007/s11947-018-2119-0

Bhargava, N., Sharanagat, V.S., Mor, R.S., y Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A

review. Trends in Food Science y Technology, 105, 385-401. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.015

Black-Solis, J., Ventura-Aguilar, R.I., Correa-Pacheco, Z., Corona-Rangel, M.L., y Bautista-Bañosa, S. (2019). Preharvest use of biodegradable polyester nets added with cinnamon essential oil and the effect on the storage life of tomatoes and the development of Alternaria alternata. Scientia Horticulturae, 245(9), 65-73. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.004

Bovi, G.G., Caleb, O.J., Klaus, E., Tintchev, F., Rauh, C., y Mahajan, P.V. (2018). Moisture absorption kinetics of FruitPad for packaging of fresh strawberry. Journal of Food Engineering, 223, 248–254. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.012

Castellanos, D.A., Herrera, D.R., y Herrera, A.O. (2016). Modelling water vapor transport, transpiration, and weight loss in a perforated modified atmosphere packaging for feijoa fruits. Biosystems Engineering, 151, 218–230. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.015

Carrillo, M. (2004). Modelamiento de la cinética de respiración dentro de un empaque de atmósfera modificada para Uchuva.

Chen, S., Wang, H., Fu, Q., Wang, R., Zhang, W., y Cai, X. (2018). Prediction of plastic film thickness based on gas permeability and validation with 'Kyoho' table grapes for optimal modified atmosphere packaging, Packaging Technology and Science, 31(7), 491-497.

https://doi.org/10.1002/pts.2379

Gaona-Forero, A., Agudelo-Rodríguez, G., Herrera, A.O., y 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/10.1016/j.fpsl.2018.07.005

Garavito, J., Herrera, A.O., y Castellanos, D.A. (2021). A combined mathematical model to represent transpiration, respiration, and water activity changes in fresh cape gooseberry (Physalis peruviana) fruits. Biosystems Engineering.

Gómez, J.M., Mendoza, S.M., Herrera, A.O., y 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

Gutiérrez, Luis A, Martínez, Sugey M, & Sierra, César A. (2011). Desarrollo de una Película polimèrica con propiedades antiempañantes. Revista Colombiana de Química, 40(1), 65-77.

Hernández-Muñoz, P., Almenar, E., Ocio, M.J., y Gavara, R. (2006). Effect of calcium dips and chitosan coatings on post-harvest life of strawberries (Fragaria x ananassa). Postharvest Biology and Technology 39(3): 247-253. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.11.006

Hernández Gozález, A. (2003). Empacado de uchuva (Physalis peruviana L.) en películas poliméricas con atmósferas modificadas. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/290

Herrera, A.O., Castellanos, D.A., Mendoza, R., y Patiño, L.S. (2020). Design of perforated packages to preserve fresh produce considering temperature, gas concentrations and moisture loss. Acta Horticulturae, 1275, 185–192. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1275.26

Lanchero, O., Velandia, G., Fischer, G., Varela, N., y García, H. (2007). Post-harvest behavior of cape gooseberry (Physalis peruviana L.) under active modified atmosphere conditions. Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8(1), 61-68. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:84

Matsumoto, K., Sakikawa, N. y Miyata, T. (2018). Thermo-responsive gels that absorb moisture and ooze water. Nature Communications, 9, 2315. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04810-8

Moncayo Martinez, D. C. (2013). Desarrollo de un recubrimiento comestible a partir de un biopolímero para prolongar la vida útil de frutas frescas. Universidad Nacional de Colombia Programa Interfacultades, Maestría En Ciencia y Tecnología Alimentos, 76. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/50858

Moreno Guerrero, C., Andrade Cuvi, M. J., y Concellón, A. (2012). Efecto del uso combinado de la radiación uv-c y atmósfera modificada sobre el tiempo de vida útil de uvilla (Physalis peruviana L.) Orgánica. Tsafiqui, 3, 43. https://doi.org/10.29019/tsafiqui.v0i3.220

Mu, H., Gao, H., Chen, H., Tao, F., Fang, X., y Ge, L. (2013). A nanosized oxygen scavenger: Preparation and antioxidant application to roasted sunflower seeds and walnuts. Food Chemistry, 136(1), 245–250.

https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.121

Nastaj, J. y Aleksandrzak, T. (2013). Adsorption Isotherms of Water, Propan-2-ol, and Methylbenzene Vapors on Grade 03 Silica Gel, Sorbonorit 4 Activated Carbon, and HiSiv 3000 Zeolite. Journal of Chemical y Engineering Data, 58(9), 2629–2641. https://doi.org/10.1021/je400517c

Olivares-Tenorio, M.L., Dekker, M., van Boekel, M.A.J.S., y Verkerk, R. (2017). Evaluating the effect of storage conditions on the shelf life of cape gooseberry (Physalis peruviana L.). LWT - Food Science and Technology, 80, 523–530. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.027

Ospina, S., y Cartagena, J. R. (2008). La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos. Revista Lasallista de Investigacion., 5(2), 112–124. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttextypid=S1794-44492008000200014

Papiernik, S.K., Ernst, F.F., y Yates, S.R. (2002) An apparatus for measuring the gas permeability of films. Journal of Environmental Quality, 31, 358-361. https://doi.org/10.2134/jeq2002.3580

Pérez, D.A., Gómez, J.M., y Castellanos, D.A. (2020). Combined modified atmosphere packaging and guar gum edible coatings to preserve blackberry (Rubus glaucus Benth). Food Science and Technology International. In press. https://doi.org/10.1177/1082013220959511

Perumal, A.B., Sellamuthu, P.S., Nambiar, R.B., Sadiku, E.R., Phiri, G., Jayaramudu, J. (2018). Effects of multiscale rice straw (Oryza sativa) as reinforcing filler in montmorillonite-

polyvinyl alcohol biocomposite packaging film for enhancing the storability of post-harvest mango fruit (Mangifera indica L.). Applied Clay Science, 158(15), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.03.008

Pinto, N., De la Vegaa, J. C., y Cañarejo, M. (2016). Utilización del método de conservación bajo atmósferas controladas en frutas y hortalizas. Agroindustrial Science, 5(1), 127–132.

https://doi.org/10.17268/agroind.science.2015.02.04

Quiroga, R. M. (2011). Metodología para la caracterización termo-mecánica de películas plásticas biodegradables. Prospectiva, 9(1), 46–51.

Ramadan, M.F. (2011). Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (Physalis peruviana): An overview. Food Research International, 44(7), 1830-1836. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.042

Reshetnikov, S, Budaev, Zh., Livanova, A., Meshcheryakov, E., y Kurzina, I. (2019). Effect of particle size on adsorption kinetics of water vapor on porous aluminium oxide material. Journal of Physics: Conference Series, 1145, 012033. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1145/1/012033

Rouquerol, J., Llewellyn, P., y Rouquerol, F. (2007). Is the bet equation applicable to microporous adsorbents? Studies in Surface Science and Catalysis, 160, 49–56. https://doi.org/10.1016/s0167-2991(07)80008-5

Sierra, N.M., Londoño, A., Gómez, J.M., Herrera, A.O., y Castellanos, D.A. (2019). Evaluation and modeling of changes in shelf life, firmness and color of 'Hass' avocado depending on storage temperature. Food Science and Technology International, 25(5), 370–384. https://doi.org/10.1177/1082013219826825.

Torres-Ossandóna, M.J., Vega-Gálvez, A., López, J., Stucken, K., Romero, J., y Di Scala, K. (2018). Effects of high hydrostatic pressure processing and supercritical fluid extraction on bioactive compounds and antioxidant capacity of Cape gooseberry pulp *(Physalis peruviana* L.). The Journal of Supercritical Fluids, 138, 215-220. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.05.005

Xanthopoulos, G., Koronaki, E. D., y Boudouvis, A. G. (2012). Mass transport analysis in perforation-mediated modified atmosphere packaging of strawberries. Journal of Food Engineering, 111(2), 326–335. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.016

Yang, Q., Fukuzumi, H., Saito, T., Isogai, A., y Zhang. L. (2001). Transparent cellulose films with high gas barrier properties fabricated from aqueous alkali/urea solutions. Biomacromolecules, 12(7), 2766-2771. https://doi.org/10.1021/bm200766v

Zhang, H., Gu, W., Li, MJ, Li, Z.Y., Hu, Z.J., y Tao, W.Q. (2014). Experimental study on the kinetics of water vapor sorption on the inner surface of silica nano-porous materials. International Journal of Heat and Mass Transfer, 78, 947–959. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.047

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un modelo cinético de respiración para frutos de uchuva en función de la concentración de gases (O_2 y CO_2) y la temperatura. Este tuvo un alto grado de ajuste empleando una cinética combinada de Michaelis-Menten con inhibición anticompetitiva y Arrhenius ($R^2_{adj.}$ = 0.964 y 0.98 respectivamente). Del mismo modo, se estableció una correlación entre la humedad de los frutos (base húmeda) y su actividad de agua (isoterma de sorción de humedad) utilizando un modelo logístico con una alta cercanía entre los datos experimentales y los predichos ($R^2_{adj.}$ = 0.998). A partir de los resultados experimentales de la pérdida de peso a diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa, se obtuvo con éxito un modelo combinado para representar la transpiración en los frutos frescos ($R^2_{adj.}$ = 0.988-0.998) teniendo en cuenta la cinética de la respiración y la relación entre la actividad del agua y la humedad. El modelo combinado de transpiración puede proporcionar los medios necesarios para mejorar los sistemas de almacenamiento y envasado de frutos de uchuva y frutas similares, controlando la pérdida de peso y la actividad del agua en el producto con el fin de aumentar la vida útil.

Las películas biodegradables poseen coeficientes de permeabilidad O_2 y CO_2 más bajos, pero del mismo orden que las películas del PP, otorgándoles mayores propiedades de barrera frente a estos gases, pero con una menor barrera al vapor de agua, lo que resulta en una mayor transferencia de humedad desde el interior del empaque y menor posibilidad de condensación. Las propiedades mecánicas fueron similares en las películas biodegradables, pero significativamente menores que para la película del PP, sin embargo, no representa un limitante dado el beneficio biodegradable y los bajos tiempos de servicio esperados para un almacenamiento de frutas. Las propiedades térmicas del PLA son similares al PP

comportándose como plásticos termosellables a diferencia de la celulosa que se degrada por encima de 110-130 °C limitando las posibilidad de procesamiento y recuperación de material. El comportamiento fisicoquímico de los frutos empacados en los sistemas configurados con materiales biodegradables como la celulosa (39 días) y el PLA (42 días) fue favorable y más estable comparado con los empaques sintéticos del PP/PET que presentaron un periodo de vida útil más corto (35 días). Con el sistema de empaque PLA/PLA se obtuvieron pérdidas de peso cercanas al 5%, condensación despreciable por su alta permeabilidad y niveles estables de O_2 y CO_2 favorables para el fruto. La evolución en la calidad de los frutos fue satisfactoria.

Se ha propuesto un sistema de empaque para frutos de uchuva que puede ser de gran utilidad para los productores pensado y configurado específicamente para los frutos provenientes de la región, analizando de forma exhaustiva sus procesos metabólicos de respiración y transpiración y sus características y atributos de calidad particulares para relacionarlos con los materiales y disposición del empaque más favorables. Los materiales propuestos para el empaque son biodegradables para reducir el impacto ambiental del producto.

4.2 Recomendaciones

Los empaques pueden ser incorporados con agentes activos que controlen la humedad y el crecimiento microbiano para tener un mayor campo de acción.

El modelamiento matemático para los procesos metabólicos de respiración y transpiración debe ser validado con frutos provenientes de otras regiones del país y/o cada una de las temporadas de cosecha.

El país requiere de acceso y producción de materiales biodegradables que facilite su inclusión en la industria y fomente su uso.

Es necesario evaluar a profundidad los periodos de biodegradabilidad y compostabilidad de los materiales establecería la viabilidad del residuo generado y su tratamiento al final del servicio.

Referencias

Asociación Nacional de Exportadores [ANALDEX]. (2018). Comportamiento de la uchuva – Producción y comercio.

Castiblanco, C. (2018). Mercado de la Uchuva. Asociación Nacional de Comercio Exterior. https://www.analdex.org/2018/02/26/mercado-de-la-uchuva/

DNP. (2020). Política para la prevención y reducción de las pérdidas y desperdicios de alimentos Dirección de Desarrollo Rural Sostenible. Departamento Nacional de Planeación.

Enguix, C. (2017). Economía Circular y plásticos: El camino hacia la sostenibilidad. https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/consumidor/economia-circular-plastico/

FAO. (2019a). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. El Estado Del Mundo (Vol. 32, Issue 3).

FAO. (2019b). PESCA Y ACUICULTURA ¿Qué sabemos? ¿Deberíamos preocuparnos? Food and Agriculture Organization. 12.

Gaitán, L., González, L., & Villamizar, C. (2018). El cultivo de la uchuva (Physalis Peruviana l.). Agroecosistemas, 6(1), 46–53. https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/163/198

Garay, C. (2019). Mil millones de objetos plásticos en el océano para 2020. NATIONAL GEOGRAPHIC. https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2019/06/mil-millones-de-objetos-plasticos-en-el-oceano-para-2020

Gómez Serrano, J. G. (2016). Diagnóstico del impacto del plástico-botellas sobre el medio vicerrectoría general de universidad abierta y a distancia facultad de ciencias y tecnologías administración ambiental y de los recursos naturales Facatativá, Cundinamarca año 2016. Universidad Santo Tomás. https://repository.usta.edu.co/handle/11634/10047

Greenpeace. (2016). Plásticos en los océanos. Dosier de Prensa, 7. http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos_en_los_oceanos_LR.pdf

Hernández, M., Barrera, J., & Melgarejo, L. (2010). Fisiología poscosecha. In Experimentos en Fisiología Vegetal.

Illanes Esparza, J. F. (2004). Envases flexibles plásticos: uso y aplicación en la industria alimentaria. (Vol. 6, Issue 2). Universidad Astral de Chile.

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. In What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2018). Balance Del Sector Hortifruticultura. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 11(3), 287–301.

Martinez Reyes, M. C. (2016). La problemática de la cultura del empaque: del diseño centrado en el consumo, al diseño centrado en la función ambiental. Universidad Nacional de Colombia, 185. http://www.bdigital.unal.edu.co/55536/

Orrego Álzate, C. E. (2001). Calor de respiración de frutas y vegetales. Noos, 14, 141–148. http://bdigital.unal.edu.co/8235/1/carloseduardoorregoalzate.2001.pdf%0Ahttp://www.bdigital.unal.edu.co/8235/

Procolombia. (2020). Ficha técnica uchuva.

Soleno Wilches, R. (2017). Tecnologías no térmicas en el procesado y conservación de alimentos vegetales. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales. https://doi.org/10.23850/24220582.172

United Nations Environment Programme. (2021). Food Waste Index.

Villada, H. S., Acosta, H. A., & Velasco, y R. J. (2007). Biodegradables Biopolymers Naturals Used in Biodegradable. Polymer.

Anexo A: Poster. Congreso Iberoamericano CIIAL 2020

Como parte del desarrollo de la tesis, se presentó el siguiente trabajo en modalidad de Poster.

CIIAL 2020
3er Congreso Iberoamericano de INGENIERÍA de los ALIMENTOS

Se deja constancia que el trabajo titulado

EVALUACIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES PARA EL ENVASADO BAJO ATMOSFERA MODIFICADA DE FRUTOS FRESCOS DE UCHUVA (PHYSALIS PERUVIANA).

cuyos autores son: Nelsy Johanna Garavito Jejen, Diego Alberto Castellanos Espinosa,

ha sido presentado en formato ePoster

en el marco del **Tercer Congreso Iberoamericano de Ingeniería de los Alimentos.**

Montevideo, 18 al 20 de noviembre de 2020

Dra. Ing. Alim. Analía Rodríguez
Secretaria

Dra. Ing. Alim. Cecilia Abirached
Presidente

Anexo B: Ponencia oral. Congreso colombiano de Ingeniería Química 2020

Como parte del desarrollo de la tesis, se presentó el siguiente trabajo en modalidad de ponencia oral.

Anexo C: Seminario universitario. Tunja 2020

Como parte del desarrollo de la tesis, se presentaron algunos de los resultados obtenidos en un seminario de investigación.

Juan Ð Castellanos
Fundación Universitaria

Personería Jurídica: RES. 2085 de 1987 del MEN
RES. 1904 del MEN, 5 de Agosto de 2002
NIT: 800.057.330-3
VIGILADA MINEDUCACIÓN

LA VICERRECTORÍA ACADÉMICA

CERTIFICA QUE:

La Ingeniera de Alimentos, **NELSY JOHANNA GARAVITO JEJÉN**, identificada con C.C Nº 1.012.405.972 de Bogotá, participó como ponente en el Seminario Sistema Integrado de Empaque para la Preservación de Uchuva (Physalis Peruviana), con el tema **"EMPAQUES BIODEGRADABLES"**, dirigido a Graduados, Estudiantes, Docentes, y personas externas de la Fundación Universitaria Juan de Castellanos, con una intensidad de ocho (8) horas, el 24 y 25 de noviembre de 2020, mediante la plataforma de Meet y Facebook Live.

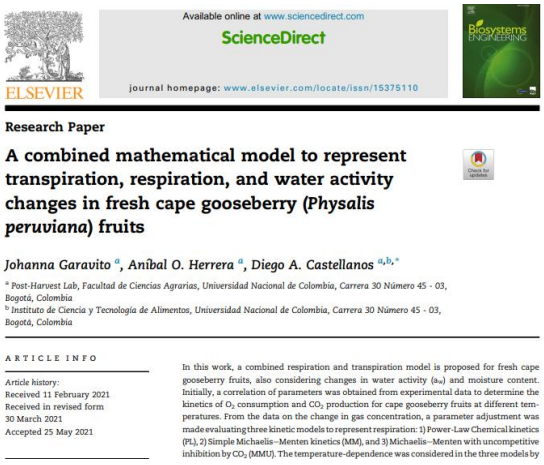
Se expide la presente certificación por solicitud de la interesada, en la ciudad de Tunja, a los treinta (30) días del mes de noviembre del año dos mil veinte (2020).

P. OSWALDO MARTÍNEZ MENDOZA PhD.
Vicerrector Académico
Fundación Universitaria Juan de Castellanos

Cultivamos ciencia, sabiduría y amor | www.jdc.edu.co
Carrera 11 No. 11-44 Tunja - Boyacá • PBX: 7458676 • Email: info@jdc.edu.co

Anexo D: Artículos científicos publicados 2021

1) ***A combined mathematical model to represent transpiration, respiration, and water activity changes in fresh cape gooseberry (Physalis peruviana) fruits. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.05.015***



Available online at www.sciencedirect.com
ScienceDirect
journal homepage: www.elsevier.com/locate/issn/15375110
ELSEVIER
Biosystems Engineering

Research Paper

A combined mathematical model to represent transpiration, respiration, and water activity changes in fresh cape gooseberry (*Physalis peruviana*) fruits

Johanna Garavito [a], *Anîbal O. Herrera* [a], *Diego A. Castellanos* [a,b,*]

[a] Post-Harvest Lab, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 Número 45 - 03, Bogotá, Colombia
[b] Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 Número 45 - 03, Bogotá, Colombia

ARTICLE INFO

Article history:
Received 11 February 2021
Received in revised form
30 March 2021
Accepted 25 May 2021

In this work, a combined respiration and transpiration model is proposed for fresh cape gooseberry fruits, also considering changes in water activity (a_w) and moisture content. Initially, a correlation of parameters was obtained from experimental data to determine the kinetics of O_2 consumption and CO_2 production for cape gooseberry fruits at different temperatures. From the data on the change in gas concentration, a parameter adjustment was made evaluating three kinetic models to represent respiration: 1) Power-Law Chemical kinetics (PL), 2) Simple Michaelis–Menten kinetics (MM), and 3) Michaelis–Menten with uncompetitive inhibition by CO_2 (MMU). The temperature-dependence was considered in the three models by

2) ***Configuration of biodegradable equilibrium modified atmosphere packages including a moisture absorber for fresh cape gooseberry (Physalis peruviana* L.) *fruits. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110761***

Contents lists available at ScienceDirect
Journal of Food Engineering
journal homepage: www.elsevier.com/locate/jfoodeng
ELSEVIER
journal of food engineering

Configuration of biodegradable equilibrium modified atmosphere packages, including a moisture absorber for fresh cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits

Johanna Garavito [a], Sandra M. Mendoza [a], Diego A. Castellanos [b,*]

[a] Post-Harvest Lab, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 Número 45 - 03, Bogotá, Colombia
[b] Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 Número 45 - 03, Bogotá, Colombia

ARTICLE INFO

Keywords:
Polylactic acid
Cellulose
Polyethylene terephthalate
Active packaging
Quality properties

ABSTRACT

Different equilibrium modified atmosphere packaging systems (EMAP) were evaluated for cape gooseberry fruits, including a moisture adsorber. Three packages were used: cellulose trays with a cellulose film, polylactic acid (PLA) trays and film, and polyethylene terephthalate trays (PET) with a film of polypropylene (PP). The packages' configuration, perforations, and amount of moisture adsorber were predefined by modeling the gas transfer in the packaging system. The packaged fruits were stored at 6 °C and 75 % RH for 6 weeks. The fruits in the PLA trays without sachets had the maximum shelf life of 42 days, while the fruits in celulose with sachets had a shelf life of 40 days compared to 35 days with the PET/PP trays and 21 days of the control fruits. With similar equilibrium gas levels between the EMAP packages, the higher permeability to water vapor of PLA prevented the formation of condensation with lower dehydration compared to the celulose packages with sachets.