

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



**“INFLUENCIA DE UN RECUBRIMIENTO COMESTIBLE A
BASE DE GOMA DE TARA (*Caesalpinia spinosa*) SOBRE LA
CALIDAD DE FRESAS (*Fragaria ananassa* cv. Aromas)”**

Presentada por:

ANA VALQUIRIA ESCALANTE VARONA

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Lima – Perú

2015

Dedicado:

A Dios por darme la vida y su amor infinito.

A mis amados padres Martha y Miguel, porque todo lo que soy se los debo a ellos y porque me han dado todo su amor, cuidado y enseñanzas. Gracias por su esfuerzo, y sacrificio para darme siempre lo mejor.

A mis hermanos Moisés y Vladimir a quienes quiero con todo mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

- A mi patrocinador el M. Sc. Walter Francisco Salas Valerio por todo su apoyo, consejos, dedicación, confianza e invaluable aporte para llevar a cabo la realización de este trabajo. Muchas gracias y que Dios lo bendiga siempre.
- A mi co-patrocinador el M. Sc. Christian Encina Zelada por su apoyo, consejos y enseñanzas que contribuyeron a mejorar este trabajo.
- Al Sr. Máximo por su invaluable apoyo en el laboratorio y por su linda amistad, gran carisma y por siempre estar dispuesto a ayudar sin esperar nada a cambio.
- A Yelena Gutiérrez por su apoyo y paciencia al ejecutar mi trabajo en el laboratorio en que labora.
- A mi gran amigo Ronald Talavera Apaza por su gran amistad, su invaluable apoyo y por siempre alentarme a seguir adelante. Amigos como tú son pocos. Gracias por todo.
- A mi querido novio Samuel Espinoza, por su gran amor y apoyo; que siempre me alentó a seguir adelante.
- A mi querida abuelita Anita, por su ejemplo de esfuerzo y fortaleza espiritual que contagia siempre.
- A mis queridas gatitas: Adri, July, Lau, Tati y Giuliana que son mis mejores amigas de la universidad y de quienes guardo los mejores recuerdos.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1.	LA FRESA	3
2.1.1.	ORIGEN Y CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA	3
2.1.2.	DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	3
2.1.3.	VALOR NUTRITIVO	5
2.1.4.	ESPECIES Y VARIEDADES	7
a.	Variedades de día corto	9
b.	Variedades de día neutro	9
2.1.5.	PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA FRESA	10
a.	Respiración.....	10
b.	Pérdida de peso	10
c.	Color	11
d.	Firmeza	11
e.	Contenido en sólidos solubles	12
f.	Potencial de hidrógeno (pH)	12
g.	Acidez titulable	13
h.	Índice de madurez	13
2.1.6.	CULTIVO DE LA FRESA EN EL PERÚ.....	14
2.2.	LA TARA	15
2.2.1.	ORIGEN Y CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA	15
2.2.2.	DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	16
2.2.3.	LA GOMA DE TARA	17
2.2.4.	PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE LA GOMA DE TARA	19
2.2.5.	EXTRACCIÓN DE LA GOMA DE TARA	19
a.	Extracción por vía húmeda.....	19
b.	Extracción por vía seca	21

2.3.	RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES	21
2.3.1.	HISTORIA	21
2.3.2.	DEFINICIÓN	22
2.3.3.	PROPIEDADES FUNCIONALES.....	23
2.3.4.	COMPONENTES DE LOS RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES	24
a.	Hidrocoloides	24
b.	Lípidos	26
c.	Composites o compuestos.....	30
2.4.	DISEÑO DE MEZCLAS	32
2.4.1.	ASPECTOS GENERALES SOBRE LOS MÉTODOS DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	36
2.4.2.	TÉCNICA PARA MEDIR EL EFECTO DE COMPONENTES EN ZONAS EXPERIMENTALES DE MEZCLAS CON RESTRICCIONES SOBRE LOS COMPONENTES.....	39
2.4.3.	GRAFICANDO EL TRAZO DE LA RESPUESTA.....	42
2.4.4.	OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA DE RESPUESTAS.....	49
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	52
3.1.	LUGAR DE EJECUCIÓN	52
3.2.	MATERIALES Y EQUIPOS	52
3.2.1.	MATERIA PRIMA	52
3.2.2.	INSUMOS.....	52
3.2.3.	MATERIALES Y EQUIPOS.....	53
3.3.	MÉTODOS DE ANÁLISIS	53
3.3.1.	ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS.....	53
3.3.2.	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	56
3.4.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	56
3.4.1.	PREPARACIÓN Y APLICACIÓN DE LAS FORMULACIONES FORMADORAS DE RECUBRIMIENTO	56
a.	Recepción.....	58
b.	Selección	58
c.	Clasificación	58
d.	Lavado y Desinfectado	58
e.	Escurreido	59

f.	Recubrimiento de los Frutos.....	59
g.	Secado	59
h.	Empacado	59
i.	Almacenamiento	59
3.5.	DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	60
3.5.1.	DISEÑO EXPERIMENTAL	60
a.	Caracterización de la materia prima	60
b.	Formulación del recubrimiento.....	60
c.	Almacenamiento	62
d.	Optimización simultánea de respuestas.....	67
e.	Caracterización del producto final	70
3.6.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	71
3.6.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	71
3.6.2.	DETERMINACIÓN DEL POLINOMIO CANÓNICO DE SCHEFFÉ Y EVALUACIÓN DEL EFECTO DE INGREDIENTES SOBRE LA TASA DE RESPIRACIÓN, PÉRDIDA DE PESO, TEXTURA Y LUMINOSIDAD	71
3.6.3.	OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA DE RESPUESTAS.....	72
3.6.4.	CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO FINAL.....	72
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	73
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	73
4.1.1.	COMPOSICIÓN PROXIMAL.....	73
4.1.2.	ACIDEZ.....	74
4.1.3.	POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH).....	74
4.1.4.	SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES.....	74
4.1.5.	ÍNDICE DE MADUREZ.....	75
4.2.	DETERMINACIÓN DEL POLINOMIO CANÓNICO DE SCHEFFÉ Y EVALUACIÓN DEL EFECTO DE INGREDIENTES SOBRE LA TASA DE RESPIRACIÓN, PÉRDIDA DE PESO, TEXTURA Y LUMINOSIDAD	75
4.2.1.	PÉRDIDA DE PESO DE LAS FRESAS RECUBIERTAS.....	75
a.	Establecimiento del modelo matemático y análisis estadístico.....	75
b.	Efecto de los ingredientes sobre la pérdida de peso de las fresas recubiertas	79
4.2.2.	FIRMEZA DE LAS FRESAS RECUBIERTAS	85
a.	Establecimiento del modelo matemático y análisis estadístico.....	85

b.	Efecto de los ingredientes sobre la firmeza de las fresas recubiertas	88
4.2.3.	TASA RESPIRATORIA DE LAS FRESAS RECUBIERTAS	94
a.	Establecimiento del modelo matemático y análisis estadístico.....	94
b.	Efecto de los ingredientes sobre la tasa respiratoria de las fresas recubiertas.....	97
4.2.4.	LUMINOSIDAD DE LAS FRESAS RECUBIERTAS	102
a.	Establecimiento del modelo matemático y análisis estadístico.....	102
b.	Efecto de los ingredientes sobre la luminosidad de las fresas recubiertas	105
4.3.	OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA DE RESPUESTAS.....	109
4.3.1.	COMPARACIÓN DEL RECUBRIMIENTO ÓPTIMO Y EL CONTROL.....	114
a.	Pérdida de peso.....	114
b.	Firmeza	116
c.	Tasa Respiratoria	118
d.	Luminosidad	120
e.	Conteo de Mohos	122
4.4.	CARACTERIZACION DEL PRODUCTO FINAL	122
V.	CONCLUSIONES	124
VI.	RECOMENDACIONES	125
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
VIII.	ANEXOS	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición de la fresa por 100 g de porción comestible.	6
Tabla 2: Especies del género <i>Fragaria</i> y su distribución.....	8
Tabla 3: Relación de los azúcares presentes en la goma de tara.	18
Tabla 4: Propiedades físicas de las gomas de <i>Caesalpinia spinosa</i> , <i>Caesalpinia paipái</i> y <i>Caesalpinia gilliesii</i>	20
Tabla 5: Polisacáridos utilizados en la formulación de los recubrimientos comestibles para frutas y sus propiedades.....	27
Tabla 6: Proteínas utilizadas en la formulación de recubrimientos comestibles para frutas y sus propiedades.....	28
Tabla 7: Lípidos utilizados en la formulación de recubrimientos comestibles para frutas y sus propiedades.....	29
Tabla 8: Coordenadas de las mezclas y espesor del vinil estimado de las mezclas tomadas a lo largo de las tres líneas de la Figura 7.	47
Tabla 9: Restricciones sobre los ingredientes principales.....	61
Tabla 10: Porcentaje de los ingredientes principales en las 16 formulaciones	63
Tabla 11: Proporciones de los ingredientes principales en las 16 formulaciones	64
Tabla 12: Formulaciones de la masa total del recubrimiento comestible.	65
Tabla 13: Composición proximal de la fresa cultivar “Aromas”.....	73
Tabla 14: Valores observados y estimados de la pérdida de peso de las fresas recubiertas.....	76
Tabla 15: Valores observados y estimados de la firmeza de las fresas recubiertas.....	86
Tabla 16: Valores observados y estimados de la tasa respiratoria de las fresas recubiertas.....	95
Tabla 17: Valores observados y estimados de la luminosidad de las fresas recubiertas.....	103
Tabla 18: Composición y variables respuestas obtenidas tras la optimización simultánea de respuestas con el programa <i>Design Expert</i> [®]	111
Tabla 19: Determinación de la deseabilidad global (D) para la formulación óptima	111

Tabla 20: Variación de las variables respuestas entre el programa <i>Design Expert</i>[®] y la prueba experimental.....	112
Tabla 21: Caracterización del producto final al inicio del almacenamiento.....	122
Tabla 22: Análisis de variancia (ANVA) de la ecuación de regresión.	132
Tabla 23: Prueba de significancia para los términos del modelo de regresión.	132
Tabla 24: Análisis de variancia (ANVA) de la ecuación de regresión.	133
Tabla 25: Prueba de significancia para los términos del modelo de regresión.	133
Tabla 26: Análisis de variancia (ANVA) de la ecuación de regresión.	134
Tabla 27: Prueba de significancia para los términos del modelo de regresión de la tasa respiratoria.	134
Tabla 28: Análisis de variancia (ANVA) de la ecuación de regresión.	135
Tabla 29: Prueba de significancia para los términos del modelo de regresión.	135
Tabla 30: Pérdida de peso (%) de fresas cv. Aromas sin recubrimiento y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.	136
Tabla 31: Análisis de Varianza para determinar el efecto significativo de los tratamientos y días de almacenamiento, sobre la pérdida de peso.	136
Tabla 32: Firmeza (gf) de fresas cv. Aromas sin recubrimiento y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.....	137
Tabla 33: Análisis de Varianza para determinar el efecto significativo de los tratamientos y días de almacenamiento, sobre la firmeza del fruto en almacenamiento.	137
Tabla 34: Tasa Respiratoria (mgCO₂.kg⁻¹.h⁻¹) de fresas cv. Aromas sin recubrimiento y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.	138
Tabla 35: Análisis de Varianza para determinar el efecto significativo de los tratamientos y días de almacenamiento, sobre la tasa respiratoria del fruto en almacenamiento.	138
Tabla 36: Luminosidad (s.u.) de fresas cv. Aromas sin recubrimiento y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.	139
Tabla 37: Análisis de Varianza para determinar el efecto significativo de los tratamientos y días de almacenamiento, sobre la luminosidad del fruto en almacenamiento.	139
Tabla 38: Conteo de mohos en fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura química de la goma de tara.	18
Figura 2: Región Simplex para tres componentes. Todos las mezclas experimentales deben ubicarse sobre o dentro del triángulo cuya ecuación es $x_1 + x_2 + x_3 = 1$	35
Figura 3: Diseño Triangular para mezclas de 3 componentes.	35
Figura 4: Superficie de sabor frutado del jugo de frutas.	38
Figura 5: Contornos de la superficie de sabor frutado del jugo de frutas.	38
Figura 6: Dirección indicada por la línea punteada para medir el efecto del incremento de la proporción x_1 del componente 1.	41
Figura 7: Región experimental del plastificante definido por las restricciones en la Ecuación 12. También se muestran las direcciones de los efectos (líneas punteadas) especificadas por las Ecuaciones 7 y 8.	45
Figura 8: Gráfica de los valores de espesor de vinyl estimados a lo largo de cada una de las líneas de los componente x_i , $i = 1, 2, 3$; llamados trazos o direcciones de Cox, usando la Ecuación 13. El gráfico fue generado con el <i>software Design Expert</i> [®] de <i>Stat-Ease</i> (1998).	48
Figura 9: Gráfico de la función deseabilidad de un lado, para varios valores de r	51
Figura 10: Flujo de operaciones para el recubrimiento de fresas.	57
Figura 11: Valores estimados vs. los observados de la pérdida de peso de las fresas recubiertas con las formulaciones experimentales.	77
Figura 12: Superficie de respuesta para la pérdida de peso de las fresas recubiertas en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glice rol (x_3).	80
Figura 13: Contornos de la superficie de respuesta para la pérdida de peso de las fresas recubiertas.	81
Figura 14: Trazos de Cox para la evaluación del efecto de cada ingrediente sobre la pérdida de peso de las fresas recubiertas.	82
Figura 15: Valores observados y estimados de la firmeza de las fresas recubiertas con las formulaciones experimentales.	87
Figura 16: Superficie de respuesta para la firmeza de las fresas recubiertas en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glice rol (x_3).	89
Figura 17: Contornos de la superficie de respuesta para la firmeza de las fresas recubiertas.	90

Figura 18: Trazos de Cox para la evaluación del efecto de cada ingrediente sobre la firmeza de las fresas recubiertas.	92
Figura 19: Valores observados y estimados de la tasa respiratoria de las fresas recubiertas con las formulaciones experimentales.	96
Figura 20: Superficie de respuesta para la tasa respiratoria de las fresas recubiertas en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3).	98
Figura 21: Contornos de la superficie de respuesta para la tasa respiratoria de las fresas recubiertas.	99
Figura 22: Trazos de Cox para la evaluación del efecto de cada ingrediente sobre la tasa respiratoria de las fresas recubiertas.	100
Figura 23: Valores observados y estimados de la luminosidad de las fresas recubiertas con las formulaciones experimentales.....	104
Figura 24: Superficie de respuesta para la luminosidad de las fresas recubiertas en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3).	106
Figura 25: Contornos de la superficie de respuesta para la luminosidad de las fresas recubiertas.	107
Figura 26: Trazos de Cox para la evaluación del efecto de cada ingrediente sobre la luminosidad de las fresas recubiertas.	108
Figura 27: Gráfico de contornos mostrando el punto óptimo de la formulación y su deseabilidad global.....	113
Figura 28: Evolución del porcentaje de la fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir (control), durante su almacenamiento de 9 días a 5 °C.	115
Figura 29: Evolución de la firmeza de la fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir (control), durante su almacenamiento de 9 días a 5 °C.	117
Figura 30: Evolución de la tasa respiratoria ($\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) de la fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir (control), durante su almacenamiento de 9 días a 5 °C.....	118
Figura 31: Evolución de la luminosidad de la fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir (control), durante su almacenamiento de 9 días a 5 °C.	121

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Resultados del análisis de regresión para la pérdida de peso	132
ANEXO 2: Resultados del análisis de regresión para la firmeza	133
ANEXO 3: Resultados del análisis de regresión para la tasa respiratoria.....	134
ANEXO 4: Resultados del análisis de regresión para la luminosidad.....	135
ANEXO 5: Análisis de la pérdida de peso de las fresas cv. Aromas sin y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.	136
ANEXO 6: Análisis de la firmeza de las fresas cv. Aromas sin y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.....	137
ANEXO 7: Análisis de la Tasa Respiratoria de las fresas cv. Aromas sin y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.	138
ANEXO 8: Análisis de la Luminosidad de las fresas cv. Aromas sin y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C	139
ANEXO 9: Análisis Microbiológico	140

RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad formular un recubrimiento comestible, aplicado a fresas (*Fragaria ananassa* cv. Aromas), en base a tres componentes principales: goma de tara (carbohidrato), cera de abeja (lípidos) y glicerol (plastificante); haciendo uso de la metodología de Diseño de Mezclas. Las fresas recubiertas fueron almacenadas a 5 °C y 90 % de humedad relativa. La efectividad de las formulaciones experimentales (16 en total) se evaluó determinando la pérdida de peso, firmeza, tasa de respiración y luminosidad del fruto, luego de nueve días de almacenamiento. En primer lugar, se estimaron las funciones matemáticas que relacionaron cada variable respuesta con las variables en estudio (proporciones de los tres componentes principales); resultando en polinomios de grado dos para todas las respuestas. A continuación, se hizo uso de los trazos de Cox para determinar la influencia de cada variable en estudio sobre cada variable respuesta y por último, mediante la metodología de Deseabilidad Global, se determinó la formulación óptima que permite minimizar la pérdida de peso y la tasa respiratoria, y maximizar la firmeza y la luminosidad de la fresa. La formulación óptima fue aquella con 0,46 % de goma de tara, 0,31 % de cera de abeja y 1,22 % de glicerol, y que permitió tener una pérdida de peso de 12,43 %, una firmeza de 505,5 gf, una tasa respiratoria de 45,28 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹ y una luminosidad de 30,21 s.u.; siendo mejor en todas las respuestas con respecto a las fresas sin recubrir.

Palabras claves: Fresa, recubrimiento comestible, goma de tara, diseño de mezclas.

ABSTRACT

This research had the objective to formulate an edible coating, applied to strawberries (*Fragaria ananassa* cv. Aromas), and based on three main components: tara gum (carbohydrate), beeswax (lipid) and glycerol (plasticizer); using Mix Design methodology. Coated strawberries were stored at 5 °C and 90 % relative humidity. The effectiveness of the experimental formulations (16 in total) was assessed by determining weight loss, firmness, respiration rate and luminosity of the fruit, after nine days of storage. Mathematical functions that linked each response variable with the study variables (proportions of the three principal components) were estimated; resulting in polynomials of degree two for all the answers. Cox's direction methodology was used to determine the influence of each variable under study over each response variable. Desirability Global methodology was used to determine the optimal formulation that would minimize weight loss and respiration rate, and maximize firmness and luminosity. The optimal formulation had 0,46 % tara gum, 0,31 % beeswax and 1,22 % of glycerol, and it gave a weight loss of 12,43 %, a firmness of 505, 5 gf, a respiration rate of 45,28 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹ and a luminosity of 30,21; being better, in contrast with uncoated strawberries.

Key words: Strawberry, edible coating, tara gum, mixture design.

I. INTRODUCCIÓN

La fresa (*Fragaria ananassa*) es un cultivo muy rentable que constituye una buena alternativa al permitir en áreas pequeñas generar empleo continuo durante su cosecha, presenta grandes posibilidades de exportación de fruta fresca como también procesada y además, gracias a la introducción de nuevas variedades en el Perú, el periodo de oferta se ha ampliado a casi todo el año; lo cual ha permitido que muchos productores se dediquen a su cultivo (MINAG, 2008).

La fresa es un fruto altamente perecible con un tiempo de vida post cosecha muy corto. El tiempo de vida útil de las fresas frescas en refrigeración (0-4°C) es usualmente de aproximadamente 5 días (Vargas *et al.*, 2006). Por sus condiciones fisiológicas resulta muy susceptible a la pérdida de humedad y al ataque por microorganismos, especialmente al hongo *Botrytis cinerea*, que ocasiona grandes pérdidas durante su transporte y comercialización porque disminuye los atributos de sabor, aroma y textura; afectando su calidad comercial y su atractiva frescura para el consumidor (Restrepo y Aristizábal, 2010).

El tiempo post cosecha de la fresa se puede ver extendido utilizando diversas técnicas combinadas con refrigeración. Una de ellas es la aplicación de recubrimientos comestibles, los cuales retardan la migración de humedad y la pérdida de componentes volátiles, reducen la tasa de respiración y retrasan cambios en las propiedades texturales (Atress *et al.*, 2010). Dichos recubrimientos pueden estar constituidos por materiales poliméricos, como proteínas y polisacáridos; y además, pueden incluir ciertas clases de lípidos (Restrepo y Aristizábal, 2010).

Actualmente, los recubrimientos más utilizados son los denominados *composites* o compuestos (formados por una mezcla de hidrocoloides y lípidos); ya que permiten obtener las ventajas funcionales de cada componente (Bourtoom, 2008a). Los componentes

minoritarios utilizados en recubrimientos usualmente incluyen polioles (como el glicerol) que actúan como plastificantes mejorando las propiedades mecánicas de los recubrimientos (Vargas *et al.*, 2006).

Como componente potencial para la elaboración de recubrimientos comestibles se tiene a la goma de tara, que es un hidrocoloide obtenido del endospermo de las semillas del árbol de la tara, especie que es oriunda de nuestro país (Goycochea, 2010). Es un producto natural que representa una oportunidad bastante interesante como estrategia de desarrollo rural ya que su empleo en la industria va en aumento, debido a que presenta diversas funciones como espesante, emulsificante, gelificante, estabilizante, etc. Sin embargo aún no se ha realizado ningún estudio sobre su aplicación en la preparación de recubrimientos comestibles para frutas.

El objetivo general de la investigación fue determinar la influencia de la composición de un recubrimiento comestible, a base de goma de tara, sobre las características de calidad de la fresa (*Fragaria ananassa cv. Aromas*).

Los objetivos específicos fueron:

- Determinar la influencia de la composición del recubrimiento comestible sobre la pérdida de peso, la firmeza, la luminosidad de las fresas y la tasa de respiración.
- Determinar la mejor formulación, que permita minimizar la tasa de respiración y la pérdida de peso, y maximizar la firmeza y la luminosidad de las fresas durante su almacenamiento.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. LA FRESA

2.1.1. ORIGEN Y CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

La fresa es una fruta conocida y apreciada desde la antigüedad, existiendo registros en escritos clásicos griegos y romanos. El nombre procede del latín «*fragans*» fragante (Brazanti, 1989 y Nunes, 2007).

El origen de la fresa es europeo, de la región alpina. En ese entonces era una fruta pequeña y de sabor intenso. En el siglo XVIII se descubrió en Chile una fresa más grande, la cual conocemos hoy como fresón o frutilla y que es la que comúnmente se siembra en todo el mundo por sus altos rendimientos y que actualmente recibe el nombre genérico de “fresa” (MINAG 2008). La fresa de frutos gruesos cultivada actualmente ha sido reconocida como un híbrido de *F. virginiana* y *chiloensis* y se designa botánicamente como la especie *Fragaria x ananassa* Duch o *Fragaria ananassa* (Brazanti, 1989; Baraona y Sancho, 1992).

La fresa pertenece al género *Fragaria* que se incluye en la Subfamilia *Rosoideae*, Familia *Rosaceae*, Orden Rosales, Sub-Clase *Rosidae*, Clase *Magnoliopsida*, Sub-Filo *Magnoliphyta*, Filo *Antophyta*, Reino *Plantae*, Dominio *Eukarya* (Nunes, 2007).

2.1.2. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

La fresa es una planta rastrera perenne, posee un tallo pequeño semisubterráneo o rizoma y un tallo modificado llamado la “corona central” en el que se encuentran las yemas axilares que pueden dar origen a flores, a estolones o a las coronas

secundarias, que son las que le dan forma de roseta a la planta (Baraona y Sancho, 1992).

Una vez que la planta obtiene cierto desarrollo, aparecen los estolones o ramificaciones de la planta que producen hojas y raíces que llegan a convertirse en nuevas plantas. Los estolones tienen la capacidad de intercambiar agua y nutrientes entre la planta madre y sus hijos, lo que les permite sobrevivir en situaciones de poca humedad o daños radiculares. Una corona puede producir de 10 a 12 estolones; estos a su vez, tienen la capacidad de producir raíces y estolones secundarios, lo que permite una producción de 4 a 6 plantas por estolón (Baraona y Sancho, 1992).

Las hojas son compuestas y trifoliadas, con borde aserrado y ligeramente pubescente en su cara inferior, poseen gran cantidad de estomas (de 300 a 400 por milímetro cuadrado). Esta característica, unida a su sistema radical adventicio superficial (de 30 a 50 cm de profundidad), la convierten en una planta de alta sensibilidad al suministro de agua, humedad ambiental, intensidad lumínica y duración del día (Baraona y Sancho, 1992).

Las flores son blancas o rosadas, poseen raquis altos o basal, según la variedad; pueden ser perfectas (hermafroditas) característica de las variedades actuales, o femeninas (pistiladas) y masculinas (estaminadas) (Baraona y Sancho, 1992).

El fruto comestible, denominado botánicamente “eterio” es un falso fruto formado por el receptáculo, en el que están insertos los aquenios (pepitas). Después de la fecundación, los óvulos al convertirse en aquenios estimulan el engrosamiento del receptáculo que, una vez transformado en carnosos, constituye el fruto (Brazanti, 1989).

Los aquenios pueden estar hundidos, superficiales o sobresalientes de la pulpa y ser pocos o muy numerosos; los sobresalientes aumentan la resistencia de la superficie, pero durante el proceso de lavado se desprenden en gran parte (Brazanti, 1989).

En la base del fruto está el cáliz, con sépalos adherentes, libres, verdes por lo general; el cáliz puede separarse fácil o difícilmente, lo cual tiene una cierta importancia en función del destino de los frutos, bien sea para consumo en fresco o para transformación industrial. La parte central del fruto o corazón, puede estar poco o muy desarrollada y puede haber frutos con “corazón vacío”, lo cual es un carácter negativo, o con corazón lleno (Brazanti, 1989).

Los frutos pueden ser de varias formas, según el cultivar: cónicos, cónico-alargados, cónico-redondeados, esferoidales, oblatos, reniformes. La forma del fruto puede ser modificada por la influencia de diversos factores: la evolución del clima puede producir formas anómalas cuando algunos estigmas y ovarios hayan sido dañados por el frío. La posición en la inflorescencia también puede influir en la forma: los frutos del eje primario tienen a ser irregulares, mientras que los de los ejes restantes tienden a una mayor regularidad. La humedad, heladas, ataques por insectos parasitarios también pueden influir en la regularidad de la forma del fruto (Brazanti, 1989).

2.1.3. VALOR NUTRITIVO

Acorde con Almenar (2005), en comparación con el resto de frutas, la fresa contiene una cantidad moderada de hidratos de carbono y un valor calórico bajo. Destaca su aporte de vitamina C, sustancias de acción antioxidante y un alto contenido de ácidos orgánicos, entre ellos cítrico, málico, oxálico y salicílico. También es rica en minerales como potasio y magnesio. Su contenido en fibra es moderado. Como compuestos activos presenta pigmentos, aceite esencial, vitamina C, taninos y flavonoides (Murcia y Hoyos, 2001; citados por Almenar, 2005). En la Tabla 1 se resume la composición básica de la fresa.

Tabla 1: Composición de la fresa por 100 g de porción comestible.

Componentes mayores	(g)
Calorías (cal)	38
Agua	89
Proteínas	0,7
Grasas	0,8
Carbohidratos	8,5
Fibra	1,4
Ceniza	0,5
Minerales	(mg)
Calcio	37
Fósforo	28
Hierro	1,2
Vitaminas	(mg)
Caroteno	0,007
Tiamina	0,04
Rivoflavina	0,05
Niacina	0,26
Ácido ascórbico reducido	42,00

FUENTE: Collazos *et al.* (1962).

2.1.4. ESPECIES Y VARIEDADES

Existen numerosas especies silvestres o cultivadas que producen frutos comestibles del género *Fragaria*, que reciben la denominación común de fresa o fresón, y que han dado origen a numerosas variedades, por cultivo o cruzamiento, destacando su amplia distribución en las zonas templadas y subtropicales con una temperatura media anual que varía de 12 °C a 20°C. Se le denomina cultivar cuando se ha realizado el entrecruzamiento artificialmente, sin embargo, variedad y cultivar se utilizan indistintamente en la práctica (Navarro, 2001; citado por Nunes, 2007).

La especie más extendida es *Fragaria vesca* L. que se encuentra silvestre por toda Europa y Asia. Otras especies importantes son *Fragaria viridis* Duch. y *Fragaria moschata* Duch., originarias del Norte de Europa y Asia. De origen americano destacan *Fragaria chiloensis* Duch., y *Fragaria virginiana* Duch. Distintas especies del género *Fragaria* están reconocidas y divididas en cuatro grupos con siete cromosomas de número base, tal y como se observa en la Tabla 2 (Nunes, 2007).

En el Perú existen diversas variedades de fresa las cuales se han introducido de Estados Unidos, Europa y otras regiones del mundo, pero en la actualidad son cinco las más cultivadas: Chandler (Americana), Tajo (Holandesa), Sern (Sancho), Aromas y Camarosa, que son también las que más se comercializan en los mercados de Lima (MINAG, 2008).

Para el clima de la costa del Perú se adaptan los cultivares de día corto trasplantadas en los meses de abril a mayo, mientras que las de día neutro, pueden ser sembradas durante todo el año, como ocurre con “Aromas” en la actualidad en Huaral. Para la sierra, en valles interandinos y valles abrigados se recomienda las cultivares de día corto (MINAG, 2008).

A continuación se describen las variedades o cultivares de día corto y de día neutro.

Tabla 2: Especies del género *Fragaria* y su distribución.

Ploidía	Especies	Distribución Geográfica
Diploides (2n = 4)	<i>Fragaria vesca</i> L. (fresa de los bosques) <i>F. tiridis</i> Duchense <i>F. nilgerrensis</i> Schlecht <i>F. daltoniana</i> J. Gay <i>F. nulvicola</i> Lindl <i>F. iinumae</i> Makino <i>F. yesoensis</i> Hara <i>F. nipponica</i> MaK <i>F. mandschurica</i> Staudt	Norte América, África, Asia y Europa Europa, Este y Centro de Asia Sudeste Asiático y China Asia (Himalaya) Asia (Himalaya) y Rusia Centro y Noreste de Japón Noreste de Japón Japón Manchuria
Tetraploides (2n = 28)	<i>F. moupinensis</i> (Franch) Card. <i>F. orientalis</i> Losinsk <i>F. corymbosa</i> Los.	Este del Tibet y China Siberia, Mongolia, Manchuria y Corea Noreste de China
Hexaploide (2n = 42)	<i>F. moschata</i> Duch. (fresa hautbois/caprón)	Noreste y Centro de Europa
Octaploides (2n = 56)	<i>F. chiloensis</i> (L.) Duch. <i>F. virginiana</i> Duch. <i>F. ovalis</i> (Lench) Rydb <i>F. iturupensis</i> Staud <i>F. x ananassa</i> Duch	Costa del Pacífico y Andes Norte América Norte América Isla Iturup, isla Kurip y Japón Híbrido

FUENTE: Hancock et al. (1996), citado por Nunes (2007).

a. Variedades de día corto

La floración se induce cuando el foto período es corto (12 horas de luz) y la temperatura fluctúa entre 14 °C y 18 °C, por lo que se trasplanta generalmente en los meses de abril a mayo. En el país las más difundidas son (MINAG, 2008):

- **Chandler**, también conocida como “Cañetana”. Originaria de la Universidad de California. Tiene muy buena aceptación en el mercado de consumo en fresco. Los frutos son de forma cónica alargada de color rojo intenso y de tamaño grande. Es de elevado rendimiento, puede tener producción continua desde agosto hasta fines de enero en condiciones de costa y tiene tolerancia al transporte.
- **Tajo**, conocida también como “Holandesa” y “Cresta de gallo”. Frutos grandes de coloración rojo anaranjada, de forma ligeramente redondeada poco achatada con tendencia a ser lobulada. Es de elevado rendimiento y tolerante al transporte.
- **Camarosa**: es precoz, de elevado rendimiento durante toda la campaña, presenta frutos grandes de color rojo intenso y brillante en su parte externa, de forma cónica y achatada, tiene buen sabor y firmeza. Por sus mejores características viene reemplazando a la “Chandler” en Estados Unidos.

b. Variedades de día neutro

El foto período no influye en la floración; la temperatura o la acumulación de horas frío tampoco induce la floración. Tienen la ventaja de producir en contra estación. Entre las más difundidas en nuestro país tenemos (MINAG, 2008):

- **Sern**: conocida también como “Sancho”. Sus frutos son de forma cónica oblonga, con tendencia a ser achatados de color rojo anaranjado brillante, calibre normal y de dureza bastante consistente, la pulpa muy consistente con corazón lleno. Puede producir en cualquier época del año.

- **Aromas:** de alta productividad, frutos de buen color y calibre muy consistente. Tiene amplio espectro de tolerancia a cambios de temperatura del medio ambiente. Puede producir en cualquier época del año.

2.1.5. PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA FRESA

La fresa, como cualquier fruto, continúa con un metabolismo activo tras su recolección. Por tratarse de un producto muy perecedero, su calidad y vida útil pueden verse mejoradas por control de los procesos de deterioro e inactivación de procesos fisiológicos, tanto del propio fruto como de los patógenos que pueda contener. Factores tanto intrínsecos como extrínsecos influyen en la extensión de su vida útil. De entre los intrínsecos, la tasa de respiración es el más importante, influenciada por circunstancias como tipo, tamaño, variedad, condiciones de crecimiento, estado de madurez, composición atmosférica y temperatura. Por otro lado, dentro de los extrínsecos se encuentran la temperatura de almacenamiento, la humedad relativa, la carga microbiana inicial, el equipo y material polimérico de envasado, el volumen y área del envase y la luz (Kader *et al.*, 1998; citados por Almenar, 2005).

a. Respiración

Las fresas se caracterizan por una alta tasa de respiración ($50-100 \text{ mlCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ a 20°C), muy dependiente de la temperatura y tiempo de almacenamiento, estado de maduración, concentración gaseosa, cantidad de etileno, etc. (Almenar, 2005).

b. Pérdida de peso

La fresa presenta una elevada tasa de transpiración, produciendo pérdidas de agua que implican arrugamiento (aspecto envejecido), disminución de peso comercial y descenso de la calidad sensorial, afectando a la apariencia, textura y jugosidad del fruto (Almenar, 2005).

En la mayoría de los frutos pérdidas del 3-5 por ciento del peso inicial en forma de agua transpirada son suficientes para promover un aspecto arrugado, perdiendo su apariencia externa inicial. Problema todavía más notable en el caso de la fresa, pues debido a su fina piel no posee una buena barrera exterior con que retener el agua (Oliás, 1998; citado por Almenar, 2005).

c. Color

El color es uno de los parámetros de calidad que más información proporciona sobre la evolución de las fresas, siendo detectable mediante colorimetría (color externo) y espectrofotometría visible (color total). El color externo se mide con los parámetros colorimétricos a^* , b^* , L^* , *chroma* y ángulo *hue*, y el color total con la concentración de antocianos, determinados como glucósido 3-pelargonidina, por ser el mayoritario de la fresa, constituyendo el 88 por ciento de los antocianos de la parte externa y el 96 por ciento de la interna (García- Viguera *et al.* 1999, citados por Almenar, 2005).

d. Firmeza

La fresa es una fruta suave que sufre una rápida pérdida de firmeza durante su maduración, lo cual contribuye enormemente a su corta vida post cosecha y a su susceptibilidad a contaminaciones fúngicas. Las propiedades de textura de la fruta están afectadas por la turgidez celular y por la estructura y composición de la pared celular de los polisacáridos. El ablandamiento de las fresas ha sido asociado con la degradación de la lamela media de las células del parénquima cortical, resultando en un dramático incremento de la solubilización de la pectina, con un ligero cambio en el peso molecular de la pectina y pequeñas disminuciones en el contenido de celulosa (Hoh y Melton, 2000; citados por Hernández *et al.*, 2008).

La textura está considerada como otro parámetro clave indicador de calidad por ser directamente proporcional al grado de madurez del fruto. Para la realización de las medidas de fuerza existen una gran variedad de posibilidades: penetración,

compresión, tensión, etc., de entre las cuales la penetración es la más utilizada en las fresas. Los métodos instrumentales más utilizados son los empíricos, que se fundamentan en someter las muestras a una fuerza y relacionan ésta con el tiempo y con la deformación (Almenar, 2005).

Durante el almacenamiento, factores como variedad, temperatura, tiempo de almacenamiento y concentraciones gaseosas influyen sobre la firmeza. Así, sólo algunas variedades de fresa presentan aumentos de firmeza en presencia de altas concentraciones de CO₂, otras no sufren modificación (Pelayo *et al.*, 2003; citados por Almenar, 2005). En cambio, independientemente de la variedad, la disminución de la temperatura genera un aumento en la firmeza de la fresa (Larsen y Watkins, 1995; citados por Almenar, 2005).

e. Contenido en sólidos solubles

Los sólidos solubles son el conjunto de determinados azúcares (glucosa, fructosa y sacarosa), ácidos orgánicos (ácido málico, ácido cítrico y ácido succínico), compuestos fenólicos, antocianos, etc., cuyas proporciones dependen de la variedad estudiada. Las fresas, tras su recolección, como continúan con sus reacciones metabólicas básicas, entre ellas la respiración, utilizan como sustrato los azúcares resultantes de la hidrólisis de la sacarosa, disminuyendo con ello los sólidos solubles del fruto, proceso que resulta activo durante todo el periodo de post recolección (Pelayo *et al.*, 2003; citados por Almenar, 2005).

f. Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es uno de los parámetros que presenta menor variación durante el periodo de post cosecha de la fresa. Diversos estudios muestran pocos o ningún cambio con el tiempo, incluso con la modificación de factores externos como temperatura, aumento de CO₂, etc. (Holcroft y Kader, 1999 y García *et al.*, 1998; citados por Almenar, 2005).

La no influencia del CO₂ podría deberse a su transformación en ácido carbónico y posterior disociación en el citoplasma, produciendo cambios de pH absorbidos por la capacidad tampón de los tejidos. Alternativamente, un pH bicarbonatado podría formarse en el interior de las vacuolas, aumentando su valor, aunque estos cambios se neutralizarían por la capacidad tampón de los ácidos orgánicos (Holcroft y Kader, 1999; citados por Almenar, 2005).

g. Acidez titulable

El ácido cítrico es el más abundante de la fresa, seguido del málico, succínico y ascórbico, razón por la que los resultados de acidez titulable se expresan en cantidad de ácido cítrico (Hancock, 1999; citado por Martínez *et al.*, 2008). La acidez titulable es necesaria para conocer la evolución del grado de madurez en las fresas, parámetro resultante de la relación entre la cantidad de ácido cítrico presentes respecto a la de sólidos solubles obtenidos. (Mitchell *et al.*, 1996; citados por Almenar, 2005).

h. Índice de madurez

El índice de madurez es la relación entre el contenido de sólidos solubles y la acidez presente en la fruta. Este parámetro suele ser muy utilizado ya que a medida que la fruta madura el contenido de azúcares (sólidos solubles) aumenta y el contenido de ácidos disminuye (González, 2010).

El índice de madurez para la recolección de fresas se basa usualmente en el color del fruto (AREX, 2013):

- Color rosado en tres cuartas partes de la superficie del fruto. Esta fruta tiene como destino al mercado para consumo al estado fresco de mercados distantes.
- Color rosado que cubre toda la superficie del fruto. Esta fruta también tiene como destino al mercado para consumo al estado fresco de mercados relativamente cercanos.

- Rojo a rojo oscuro. Fruta para consumo fresco de inmediato o para ser procesado industrialmente.

2.1.6. CULTIVO DE LA FRESA EN EL PERÚ

La fresa (*Fragaria ananassa* Duch) es una especie hortícola que se ha cultivado desde hace varios siglos en Europa, Asia y los Estados Unidos de América; constituyéndose como una de las principales frutas de consumo de los países desarrollados (MINAG, 2008).

La producción mundial de fresa alcanzó en el año 2008, 4 068 454 toneladas; el 37,38 por ciento se cosechó en América, el 34,90 por ciento en Europa, el 18,46 por ciento en Asia, el 8,44 por ciento en África; mientras que solo el 0,82 por ciento se realizó en Oceanía. En Estados Unidos se concentra el 28,23 por ciento de la producción mundial; España es segundo (6,49 por ciento); Turquía tercero (6,42 por ciento) y México ocupó el cuarto lugar en producción con 207 485 toneladas que representaron el 5,10 por ciento del total mundial en el año 2008 (MINAG, 2008).

En nuestro país el cultivo de fresa se ha venido incrementando. El Perú ocupó el lugar 26 en la producción mundial durante el año 2007; debido a que hay condiciones de clima y suelo adecuados para el establecimiento de este cultivo (MINAG, 2008).

El cultivo de la fresa se ha convertido en una actividad productiva a tener muy en cuenta, principalmente en dos regiones, Lima y La Libertad, tanto en lo económico como en lo social. El crecimiento de la actividad es notable por el aumento en los niveles de producción y comercialización de fresa en presentaciones para consumo en fresco, así como en productos procesados diversos. Dentro de las oportunidades de negocios en el sector agropecuario, el cultivo de la fresa está identificado como una buena alternativa, de modo que aprovechando la globalización y los tratados de libre comercio, puede acceder a nuevos mercados (MINAG, 2008).

La cosecha de fresas se realiza entre los meses de agosto a febrero, aunque en Huaral, con la introducción de nuevas variedades y la ayuda de su microclima especial permite tener cosecha todo el año. Al iniciar la cosecha en un campo, se realiza el recojo cada dos o tres días, cogiendo frutas de color rojo maduro que son depositadas en cosecheras para luego ser trasladados a un centro de selección donde se forman categorías, tales como extra, primera, segunda y tercera; todo esto se hace considerando el tamaño, color, estado de frescura y homogeneidad del producto. Es recomendable utilizar cadena de frío con la finalidad de preservar el producto, se traslade en buenas condiciones a los mercados y mesa de los consumidores, teniendo en cuenta que la temperatura es el principal factor de deterioro de deterioro de la fresa (MINAG, 2008).

La comercialización de la fresa para el mercado nacional se realiza en los centros de acopio, donde los productores realizan la entrega de su cosecha a los mayoristas y algunos lo hacen directamente al mercado (MINAG, 2008).

2.2. LA TARA

2.2.1. ORIGEN Y CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

La tara (*Caesalpinia spinosa* Molina Kuntze) es una planta nativa del Perú, utilizada desde la época prehispánica en la medicina folklórica y en tiempos recientes como materia prima en el mercado mundial de hidrocoloides alimenticios y taninos (Goycochea, 2010).

La tara se ubica taxonómicamente en (Goycochea, 2010):

Reino:	<i>Plantae</i>
División:	Fanerógamas
Clase:	Dicotiledoneas
Sub-clase:	Arquidomideas
Orden:	Rosales
Familia:	<i>Fabaceae</i>

Género: *Caesalpinia*
Nombre científico: *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze.

Esta especie se distribuye desde las zonas áridas de Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia; llegando hasta los 32° de latitud sur al norte de Chile (Flores *et al.*, citados por Goycochea, 2010). En el Perú, la tara se encuentra desde la costa y sierra norte (Cajamarca y La Libertad), hasta el centro y sur (Ancash, Huánuco, Junín, Ayacucho, Arequipa, Cuzco y Tacna, entre otros) (Reynel y León, 1990; citados por Goycochea, 2010).

2.2.2. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

La tara se caracteriza por tener un fuste único en algunas poblaciones pero en otras varios tallos (más de cuatro), rectos y cortos. El tronco está cubierto por una corteza gris y agrietada provista de espinas triangulares (Reynel y León, 1990; citados por Goycochea, 2010).

La copa del árbol de tara es generalmente irregular, puede alcanzar un diámetro de hasta seis metros en su madurez. Sus hojas son compuestas bipinadas, alternas y dispuestas en espiral, cuyos folios (de 6 a 8 pares) dan la forma de plumas con una longitud que varía entre 8 y 12 cm. Las flores son hermafroditas, zigomorfas de cáliz irregular, con un sépalo muy largo (1 cm). La corola presenta sépalos de color amarillento o amarillo rojizo (Reynel y León, 1990; citados por Goycochea, 2010).

Los frutos de la tara son vainas indehiscentes de color rojizo amarillo de 8 a 10 cm de largo por 1,5 a 2,5 cm de ancho y contienen de 8 a 10 granos redondeados y ligeramente aplastados por vaina. Los granos maduros son duros, de color pardo oscuro, brillosos debido a una capa de cera que los cubre y los hace impermeables (Goycochea, 2010).

2.2.3. LA GOMA DE TARA

La goma de tara, se obtiene a partir del endospermo de la semilla. La semilla representa en peso el 33-38 por ciento de la vaina. En la semilla de tara, en su conformación se encuentra compuesta por cáscara (39 por ciento), germen (37 por ciento), goma (24 por ciento) (Villanueva, 2007).

La goma de tara es un aditivo alimentario aprobado por la comisión del *Codex Alimentarius* y tiene la función de espesante y estabilizante. Como aditivo del *Codex* se le ha otorgado el número INS 417 (FSANZ, 2006).

La goma de tara consiste principalmente en polisacáridos de alto peso molecular, sobre todo de galactomananos. El componente principal consiste en una cadena lineal de unidades de (1-4)- β -D- manopiranososa (manosa) con unidades de α -D- galactopiranososa (galactosa) unidas por enlaces (1-6). Las unidades de galactosa de distribuyen de manera no uniforme a través de las cadena de manano. La presencia de unidades secundarias de galactosa tiende a inhibir la agregación, entonces aquellas gomas con más cadenas laterales o secundarias son más fáciles de disolver en agua (FSANZ, 2006).

Su estructura y funcionalidad es similar a la de los demás galactomananos establecidos: goma garrofin y goma guar (Gutiérrez, 2008). La relación de manosa a galactosa en la goma de tara es de 3:1 (comparada a la goma de algarrobo que es 4-4.5:1 y la de goma guar 2:1) (Cubero *et al.*, 2002 y FSANZ, 2006).

En la Figura 1, se encuentra representada la conformación química de la goma de tara.

Los componentes monoméricos que conforman sus hidocoloides son la galactosa y manosa, encontrándose estas en un porcentaje y relación, los cuales se muestran en la Tabla 3 (Siccha y Lock de Ugaz, 1994).

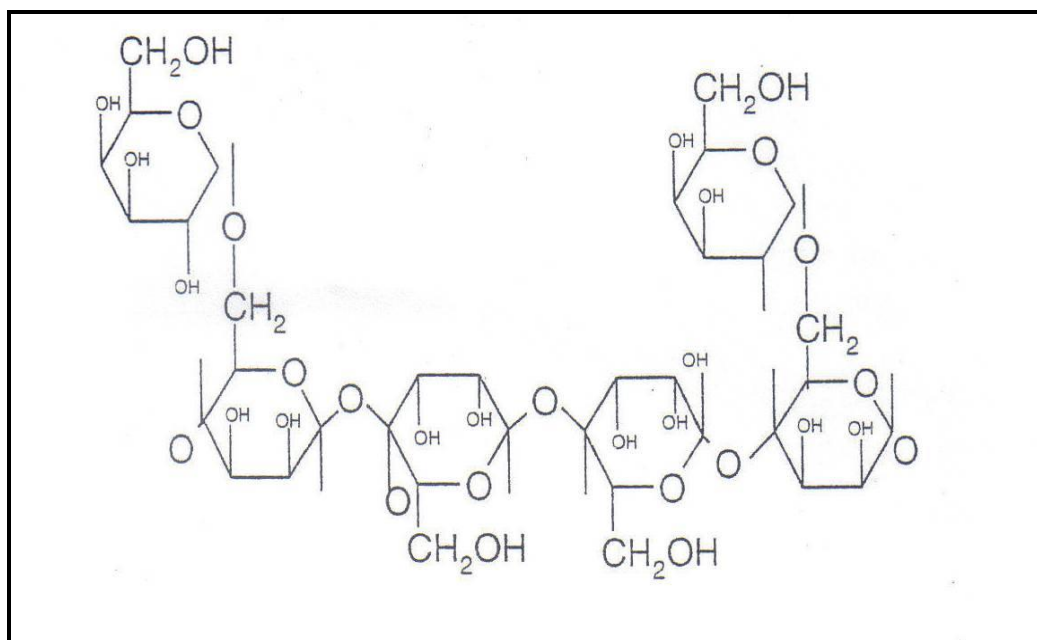


Figura 1: Estructura química de la goma de tara.

FUENTE: Cubero *et al.* (2002).

Tabla 3: Relación de los azúcares presentes en la goma de tara.

Azúcar	Contenido %
Manosa	70,9
Glucosa	1,90
Galactosa	24,41
Arabinosa	2,80
Relación Galactosa:Manosa	1:2,9

FUENTE: Siccha y Lock de Ugaz (1994).

2.2.4. PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE LA GOMA DE TARA

Según Pszczola (2003), citado por Gutiérrez (2008); la goma de tara tiene buena solubilidad y viscosidad en agua fría, entre 24 y 30 °C. También menciona que al igual que la goma garrofín, esta actúa sinérgicamente con kappa-carragenina y goma xantana incrementando la resistencia del gel haciéndolos menos propensos a la sinéresis. No obstante, afirma que las soluciones de goma de tara son más viscosas y de fina textura que las soluciones de goma garrofín. Además menciona que esta goma provee una mejor protección a choques térmicos, requiere usarse en niveles 20 a 25 por ciento menos que la goma garrofín y ofrece resistencia a la separación en procesos con gran cizalla.

En la Tabla 4 se muestran las propiedades de la goma de tara *Caesalpinia spinosa* comparada con otras gomas del género *Caesalpinia*, en solución acuosa al 1 por ciento.

2.2.5. EXTRACCIÓN DE LA GOMA DE TARA

La extracción de la goma de tara se da por dos vías: húmeda y seca (Rojas, 1991 y Fuentes, 1998).

a. Extracción por vía húmeda

Rojas (1991), determinó el flujo de operaciones para la obtención y purificación de goma de tara por vía húmeda, que consistió en una extracción con agua de las semillas previamente quebradas, filtrado de la suspensión, decoloración del extracto con hipoclorito de sodio al 3 por ciento, neutralización con ácido cítrico al 2 por ciento y secado por atomización a 195 °C.

Tabla 4: Propiedades físicas de las gomas de *Caesalpinia spinosa*, *Caesalpinia paipái* y *Caesalpinia gilliesii*.

Propiedades	<i>Caesalpinia paipái</i> (Charán)	<i>Caesalpinia spinosa</i> (Tara)	<i>Caesalpinia gilliesii</i> (Algarrobillo)
Solubilidad			
Agua Fría (25 °C)	40-50 %	50-60 %	15-30 %
Agua Caliente (98 °C)	Completa	Completa	Completa
Tiempo disolución (h)	2	2	3
Viscosidad (Cp)*			
Disuelta en agua fría (25 °C) y medida a esa misma temperatura.	1000-1500	1500-3000	500-850
Disuelta en agua caliente (98 °C) pero medida a 25 °C.	3000-4000	3000-4200	1200-2100
Solubilidad en etanol	Insoluble	Insoluble	Insoluble
pH	3-10	3-10	3-10
Peso molecular	281500	351400	221400

*Solución al 1 %.

FUENTE: Siccha y Lock de Ugaz (1994).

Céspedes (1986), citado por Fuentes (1998); determinó un método para la obtención de goma de algarrobo, muy parecida a la goma de tara, consistente en moler la semilla, tamizarla, molerla nuevamente, extraer la goma con agua destilada en una proporción de 1/20 por 55 minutos a 80 °C y pH 6,4. Luego filtrar la solución, precipitarla con alcohol (en una relación solución: alcohol de 1:6), separar la goma y secarla.

b. Extracción por vía seca

Se han realizado ensayos técnicos para separar la goma de la semilla de tara por la vía seca. Uno de estos procedimientos consistió en someter las semillas a un shock térmico a 200 °C por 5 minutos, quebrado grosero en un molino de martillos y tamizado para separar la goma. Mediante este método se obtiene una goma cruda con impurezas y sobre todo con bajos rendimientos (Rojas, 1991).

Otro de los métodos para obtención de la goma por vía seca es someter las semillas a expansión a alta temperatura y alta presión donde se consigue un desprendimiento de la goma de los demás componentes de la semilla (almendra y cáscara) al producirse la descompresión. Este proceso no arrastra contaminantes, pues el producto no presenta taninos y el tenor de metales pesados está muy por debajo de lo establecido por la normativa del *Codex Alimentarius* (Fuentes, 1998).

2.3. RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES

2.3.1. HISTORIA

El encerado de frutas se remonta a la China del siglo XII que practicaba esta tecnología para reducir la deshidratación de cítricos. El desarrollo de ceras modernas comenzó alrededor de 1930 en Estados Unidos, con la aplicación de ceras de parafina a naranjas. Estas ceras fueron sustituidas a finales de la siguiente década por las ‘ceras solventes’ o soluciones de resinas sintéticas (cumarona-indeno o colofonia) en hidrocarburos de petróleo (Hardenburg, 1967; citado por

Navarro, 2007). Posteriormente se formularon las ceras al agua o emulsiones acuosas de cera carnauba, candelilla y de polietileno que retardaban la deshidratación pero no aportaban tanto brillo como las ceras solventes. Hacia 1960, se empezaron a utilizar ceras al agua que incluían resinas, como la goma laca, que mejoraban sustancialmente el brillo de las ceras al agua desarrolladas inicialmente (Petratrek *et al.* 1999; citados por Navarro, 2007).

Desde su origen hasta nuestros días, según los objetivos perseguidos y la legislación vigente, las características de los recubrimientos, y en concreto su composición, han sido objeto de continuas modificaciones. Así el agua, como solvente de las formulaciones de recubrimiento, ha reemplazado a los hidrocarburos de petróleo y el uso de algunos componentes ha dejado de estar autorizado por la legislación de los distintos países. En España, por ejemplo; la legislación vigente desautoriza el uso de componentes como la cera montana, la resina de colofonia y la parafina utilizados con anterioridad. La composición de los recubrimientos, por tanto, está sujeta a continuos cambios en base a las necesidades de cada momento y la tendencia actual es excluir los ingredientes que pudieran causar algún perjuicio al consumidor (Navarro, 2007).

En los últimos años el creciente interés de consumidores y productores por productos saludables, así como por preservar el medioambiente, ha impulsado el desarrollo de recubrimientos formados a partir de sustancias naturales comestibles y biodegradables (Navarro, 2007).

2.3.2. DEFINICIÓN

Los recubrimientos comestibles pueden ser definidos como una capa delgada de material aplicada a la superficie de un alimento y que puede ser consumida como parte del mismo (Guilbert *et al.*, 1995; citado por Vargas *et al.*, 2008).

Se presentan en formas diferentes; como *film* es una fina película formada separadamente del alimento y aplicada después sobre el mismo. Como revestimiento o recubrimiento, es una suspensión o emulsión aplicada directamente

sobre la superficie del alimento donde es secada formando una fina película sobre el producto (Guilbert *et al.*, citado por Sonti, 2003 y por Durango *et al.*, 2011).

2.3.3. PROPIEDADES FUNCIONALES

Constituyen una barrera semipermeable a los gases y al vapor de agua que retrasa el deterioro del alimento, mejoran las propiedades mecánicas, ayudan a mantener la integridad estructural del producto que envuelven, retienen compuestos volátiles y también pueden actuar de vehículo de aditivos alimentarios (antimicrobianos, microorganismos de control biológico, antioxidantes, aromatizantes, colorantes, etc.). Aplicados a frutas permiten controlar la respiración y senescencia de forma similar a las atmósferas modificadas, ejerciendo una barrera a los gases que reduce el deterioro del fruto. Ejercen, asimismo, una barrera al vapor de agua que reduce la transpiración del fruto y el deterioro asociado a este proceso fisiológico (Navarro, 2007).

Kester y Fennema (1986) mencionan que los recubrimientos comestibles deben presentar ciertos requerimientos funcionales que permitan controlar o aminorar las causas de alteración de los alimentos a recubrir. Algunos de estos requerimientos, dependientes de la naturaleza del producto alimenticio al cual se aplica y de su principal mecanismo de deterioro, son:

- Propiedades sensoriales: deben ser transparentes, no otorgar sabor y olor diferente al alimento y no ser detectados durante su consumo.
- Propiedades barrera: deben presentar una adecuada permeabilidad al vapor de agua y solutos y una permeabilidad selectiva a gases y volátiles.
- Deben contener sustancias de grado alimentario, seguras para la salud. Deben requerir una tecnología simple para su elaboración y materias primas de costo relativamente bajo.

2.3.4. COMPONENTES DE LOS RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES

Según la FDA (2006), los recubrimientos comestibles son aquellos formados a partir de formulaciones que contengan aditivos permitidos para su uso alimentario. En la Unión Europea estos materiales se regulan por la directiva 95/2/CE del 20 de febrero de 1995, relativa a aditivos alimentarios distintos de los edulcorantes. La última revisión legislativa es la Directiva 06/52/CE del 5 de Julio de 2006 (Navarro, 2007 y Vargas *et al.*, 2008).

De acuerdo a lo establecido por la FDA, la cantidad de los ingredientes usados en el recubrimiento debe ser sólo aquella necesaria para lograr el efecto deseado, y los ingredientes tienen que ser GRAS y deben de estar listados en el código mencionado (Vargas *et al.*, 2008). Según Bourtoom (2008a), durante su manufactura, los ingredientes de los recubrimientos comestibles deben ser dispersos y disueltos en un solvente como el agua, alcohol o una mezcla de alcohol y agua o una mixtura de otros solventes.

Los componentes utilizados para la preparación de recubrimientos comestibles pueden ser clasificados en tres categorías: *hidrocoloides* (proteínas y polisacáridos), *lípidos* (como ácidos grasos, acilgliceroles, ceras, etc.) y *composites* (mezclas de polisacáridos, proteínas y/o lípidos) (Bourtoom, 2008a y Durango *et al.*, 2011). Los componentes minoritarios usualmente incluyen polioles que actúan como plastificantes (como el glicerol), reguladores de pH (como el ácido acético o láctico) (Vargas *et al.*, 2008) y emulsificantes de distinta naturaleza química que mejoran las propiedades de los recubrimientos (Navarro, 2007). También se pueden incluir agentes antimicrobianos, colorantes y saborizantes (Bourtoom, 2008a).

a. **Hidrocoloides**

Son elaborados a base de polisacáridos o proteínas, los cuales presentan baja permeabilidad al oxígeno y dióxido de carbono; pero alta permeabilidad al vapor de agua, debido a su naturaleza hidrofílica (Navarro, 2007; Pastor, 2010 y Durango *et al.*, 2011).

Los polisacáridos y las proteínas son polímeros que forman redes moleculares cohesionadas por una alta interacción entre sus moléculas (puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals, London, Debye, de cristalización o de valencia primaria). Su cohesión molecular les confiere buenas propiedades mecánicas, pudiendo ejercer de matriz estructural del recubrimiento, y buenas propiedades barrera a gases (O₂ y CO₂) (Kester y Fennema, 1986). Sin embargo, la polaridad de estos polímeros hace que sean afines al agua y que esta se integre fácilmente en su estructura estableciendo puentes de hidrógeno con las moléculas del polímero, reemplazando las uniones entre las moléculas del propio polímero. De esta manera, el polímero pierde cohesión y aumenta la permeabilidad tanto al agua como a los gases (McHugh y Krochta, 1994; citados por Navarro, 2007).

Los polisacáridos son los hidrocoloides que más se utilizan como recubrimientos en frutas y hortalizas, ya que forman parte de la mayoría de las formulaciones que actualmente existen en el mercado (Vargas *et al.*, 2008). A pesar de que los recubrimientos a base de polisacáridos pueden no proveer una buena barrera al vapor de agua, estos recubrimientos pueden actuar como agentes secuestrantes y retardantes de la pérdida de humedad en los alimentos (Kester y Fennema, 1986).

Los principales polisacáridos que pueden ser incluidos en las formulaciones de los recubrimientos comestibles son el almidón y sus derivados, los derivados de celulosa, alginato, carragenina, quitosano, pectina y diversas gomas (Vargas *et al.*, 2008 y Durango *et al.*, 2011). La Tabla 5 muestra las características de los principales polisacáridos utilizados en la formulación de los recubrimientos.

Las proteínas utilizadas en la formulación de recubrimientos comestibles pueden ser de origen animal (caseínas, proteínas del suero lácteo) o de origen vegetal (zeína de maíz, gluten de trigo, y proteína de soja, principalmente) (Vargas *et al.*, 2008 y Pastor, 2010) y dependiendo de este origen muestran una amplia variedad de características moleculares. Así, las proteínas varían en su peso molecular, conformación, carga (dependiendo del pH), flexibilidad y estabilidad térmica y las diferencias en estas características moleculares determinarán su habilidad para formar recubrimientos así como las características de los recubrimientos

formados (Pastor, 2010). La Tabla 6 muestra ejemplos de aquellas proteínas utilizadas en recubrimientos, junto con sus características funcionales principales.

Las proteínas añaden valor nutricional a los alimentos que envuelven pero, por motivos culturales o de salud, pueden ser socialmente rechazadas. Así, las proteínas animales pueden ser rechazadas por personas vegetarianas o por personas a las que su religión se lo prohíba. Otras proteínas pueden causar intolerancias, como la intolerancia al gluten (enfermedad celiaca), a la lactosa de la leche y a las proteínas de la leche de vaca (Baldwin, 2002; citado por Navarro, 2007).

b. Lípidos

Formados por compuestos hidrofóbicos y no poliméricos, con buenas propiedades barrera al vapor de agua y a los gases. Reducen la transpiración, la deshidratación, la abrasión en la manipulación posterior y pueden mejorar el brillo (Pastor, 2010). Sin embargo, los recubrimientos basados en lípidos presentan una superficie grasienta, propiedades organolépticas no deseadas como un sabor a cera y cierta rancidez (Pastor, 2010) y propiedades mecánicas pobres (Ramos *et al.*, 2010).

Los lípidos comestibles usados para desarrollar recubrimientos comestibles se muestran en la Tabla 7. Se incluyen cera de abeja, cera de candelilla, cera carnauba, triglicéridos, monoglicéridos acetilados, ácidos grasos, alcoholes grasos y ésteres de sucrosa. Las resinas comestibles incluyen Shellac y resina terpeno (Vargas *et al.*, 2008). Las sustancias lipídicas más efectivas son la cera de parafina y la cera de abejas (Bourtoom, 2008a).

La función principal de un recubrimiento lipídico es bloquear el transporte de humedad debido a su baja polaridad (Bourtoom, 2008a). Esto último es muy importante, ya que un gran número de estudios concuerdan que el uso de lípidos en recubrimientos sobre frutos frescos y vegetales controla su desecación (Vargas *et al.*, 2008).

Tabla 5: Polisacáridos utilizados en la formulación de los recubrimientos comestibles para frutas y sus propiedades.

Polisacárido	Fuente	Otros	Permeabilidad al vapor de agua (WVP) ^a			Permeabilidad O ₂ /CO ₂ (P) ^b			
			WVP x 10 ¹¹	Gradiente HR (%/%)	T (°C)	PO ₂	PCO ₂	HR (%)	T (°C)
MC (E461)	Celulosa	GRAS, flexible	7.55	0/75	25	1.12	64.19	0	30
HPC (E463)	Celulosa	GRAS	11	-	-	1.01	62.03	0	30
HPMC (E464)	Celulosa	GRAS, termoplástico	105	0/85	27	0.01-0.1	-	50	25
Almidón	Papa, maíz	frágil	217	74/50	23	137.5	2523.7	63.8	20
Alginato (E401-405)	Algas marrones	frágil	390	100/50	20	-	-	-	-
Quitosano	Caparazón de crustáceos	GRAS, antimicrobiano	360	100/50	25	0.9	15.33	93	25
Pectina (E440)	Cáscara de frutas	GRAS	-	-	-	2.55	40.78	96	25
Carragenina (E407)	Algas rojas	frágil	190	100/50	25	0.362	-	-	-
Goma arábiga (E414)	<i>Acacia senegal</i>	buena adhesión	-	-	-	-	-	-	-
Goma Guar (E412)	<i>Cyanopsis tetragonolobus</i>	agente endurecedor							
Goma Xanthan (E415)	<i>Xanthomonas campestris</i>	buena adhesión							
	Polietileno de baja densidad		0.07-0.097	0/90	38	1.92	10.36	90	25
	Polietileno de alta densidad		0.024	0/90	38	0.642	18.75	90	25

MC = metilcelulosa, HPC = Hidroxipropil celulosa, HPMC = Hidroxipropil metilcelulosa, ^a (g·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹), ^b (ml·µm/(m²·d·Pa)).

FUENTE: Vargas *et al.* (2008).

Tabla 6: Proteínas utilizadas en la formulación de recubrimientos comestibles para frutas y sus propiedades.

Proteína	Fuente	Otros	Permeabilidad al vapor de agua (WVP) ^a			Permeabilidad O ₂ /CO ₂ (P) ^b			
			WVP x 10 ¹¹	Gradiente HR (%/%)	T (°C)	PO ₂	PCO ₂	HR (%)	T (°C)
Zeína	Maíz	GRAS	8.9-13.2*	0/85	21	0.25	1.13	60	20
Gluten	Trigo	Frágil	4.3	0/50	23	1.88	46.88	91	25
Soya	Fríjol de soya	Flexible	354	100/50	25	0.067	-	50	25
Proteína del suero	Leche	Flexible	417	100/55	25	0.001-0.01	-	50	25
Caseinato de sodio	Leche	Frágil	42.5	0/81	25	0.76	4.56	77	25

^a (g·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹), ^b (ml·µm/(m²·d·Pa)), * Con plastificante

FUENTE: Vargas et al. (2008).

Tabla 7: Lípidos utilizados en la formulación de recubrimientos comestibles para frutas y sus propiedades.

Lípido	Fuente	Otros	Permeabilidad al vapor de agua (WVP) ^a			Permeabilidad O ₂ /CO ₂ (P) ^b			
			WVP x 10 ¹¹	Gradiente HR (%/%)	T (°C)	PO ₂	PCO ₂	HR (%)	T (°C)
Shellac (E904)	Insectos	GRAS	0.462-0.66	0/100	30	0.083	0.29	60	20
Cera de abejas (E 901)	Cera de abejas	GRAS	0.058	0/100	25	0.092	-	0	25
Cera candelilla (E902)	Exudado de plantas	GRAS	0.017	0/100	25	0.537	2.04	60	30
Cera carnaúba (E903)	Exudado de plantas	GRAS	0.033	0/100	25	0.016	-	0	25
Ácido grasos (E471)	Material vegetal o animal	GRAS	0.22-3.47	12/56.	23	-	-	-	-

^a (g·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹), ^b (ml·µm/(m²·d·Pa)

FUENTE: Vargas *et al.* (2008).

c. *Composites o compuestos*

Son formulaciones mixtas de hidrocoloides y lípidos que aprovechan las ventajas de cada grupo y disminuyen sus inconvenientes. En general, los lípidos aportan resistencia al vapor de agua y los hidrocoloides, permeabilidad selectiva al O₂ y CO₂, durabilidad, buena cohesión estructural o integridad (Navarro, 2007; Bourtoom, 2008a; Vargas *et al.*, 2008; Pastor, 2010 y Durango *et al.*, 2011).

Los *composites* pueden ser de capas separadas, llamados “recubrimientos multilaminados o bicapa”, o formados por una única capa llamados “recubrimientos emulsionados”. Los bicapa se forman en dos etapas: en la primera se forma la base de polisacárido o proteína y en la segunda, se aplica el lípido sobre la base previamente formada. En los recubrimientos en monocapa, es necesaria la dispersión o emulsión del lípido en la fase hidrofílica que contiene la disolución de hidrocoloide, y su posterior extensión y secado (Navarro, 2007; Vargas, 2008 y Pastor, 2010). El método de aplicación afecta la propiedad barrera de las películas obtenidas (Guilbert, 1986; citado por Bourtoom, 2008a).

Desde el punto de vista de la transferencia de masa, los recubrimientos bicapa son los más eficaces como barrera al vapor de agua. Sin embargo, debido a que el proceso de preparación incluye etapas de laminado y de secado en las que es necesario el uso de disolventes y altas temperaturas, su producción resulta más costosa y menos segura que la de los recubrimientos emulsionados (Vargas, 2008 y Pastor, 2010). Además, también es posible que con el tiempo las láminas se separen. (Mc Hugh, 1996; citado por Pastor, 2010).

Las propiedades de los recubrimientos emulsionados se pueden mejorar añadiendo agentes emulsificantes a las formulaciones. Los emulsificantes favorecen la dispersión del lípido en la matriz hidrocoloide y mejoran la capacidad del recubrimiento para impregnar al alimento y formar una capa continua en la superficie del mismo (Navarro, 2007). Algunos de los emulsificantes usados en la formulación de recubrimientos comestibles son: ácidos grasos, mono acilglicerol, lecitina y sus derivados, etilenglicol, monoestearato, glicerol monoestearato, ésteres

de ácidos grasos y sorbitan o polioxeno (*Tweens*), ésteres de sacarosa y ácidos grasos (Baldwin, 1999; citado por Navarro, 2007).

Las formulaciones de recubrimientos pueden incluir agentes plastificantes que aportan flexibilidad al recubrimiento mejorando su integridad física (Navarro, 2007). Estos compuestos disminuyen las fuerzas intermoleculares en las cadenas del polímero produciendo un descenso en las fuerzas de cohesión y por tanto, imparten movilidad molecular a la matriz, plastificándola (Pastor, 2010). Sin embargo, la reducción de la cohesión del polímero se traduce en un incremento de la permeabilidad a los gases y al vapor de agua del recubrimiento (Mchugh y Krochta, 1994; citados por Navarro, 2007). Por el contrario algunos estudios revelan que la adición de plastificantes pueden mejorar las propiedades barrera al vapor de agua y si las formulaciones contienen lípidos el efecto es aún mayor (Durango *et al.*, 2011).

Sothornvit y Krochta (2005), citados por Navarro (2007); mencionan que algunos de los plastificantes más utilizados en la formulación de recubrimientos son polioles como glicerol, polietilenglicol, propilenglicol, sorbitol, sacarosa y glucosa, que tienen naturaleza hidrofílica y reducen significativamente la barrera al vapor de agua del recubrimiento. Para preservar la barrera al vapor de agua de los recubrimientos se pueden utilizar otros plastificantes de naturaleza hidrofóbica, como los ácidos grasos y sus derivados, y los aceites que, sin embargo, aumentan la permeabilidad al oxígeno del recubrimiento. Por tanto, en función de las características requeridas del recubrimiento se pueden utilizar un tipo u otro de plastificante, o una combinación de ambos.

Una innovación de los filmes y revestimientos comestibles es que pueden servir de vehículos para diferentes sustancias como antimicrobianos, vitaminas, nutrientes, saborizantes, antioxidantes, colorantes u otro ingrediente funcional que interactúa con el alimento para mejorar su estabilidad, seguridad, calidad y funcionalidad (Durango *et al.*, 2011).

2.4. DISEÑO DE MEZCLAS

Cuando las proporciones en que se mezclan los ingredientes de un producto constituyen las variables de entrada o independientes, lo más adecuado es emplear un “Diseño de Mezclas”. El empleo de este tipo de diseños adquiere gran importancia en campos como el de la investigación en alimentos, debido a que el desarrollo de cualquier nuevo producto o la modificación de uno ya existente que implique la mezcla de dos o más ingredientes requiere de alguna forma la realización de experimentos de mezcla (Hare, 1974).

En un diseño de mezcla se asume que la característica medida en el producto final depende solamente de los porcentajes o proporciones de los ingredientes individuales que están presentes en la formulación, mas no de la cantidad total de la formulación; y por tal motivo está sujeta a cambios si dichos porcentajes o proporciones varían (Cornell, 2002 y Bondari, 2005).

La característica distintiva de un diseño de mezclas es que los factores controlables o independientes representan cantidades proporcionales de la mezcla, donde las proporciones son por volumen, por peso o por fracción molar. Las proporciones son no negativas (Ecuación 1), y si se expresan como fracciones de la mezcla; deben sumar la unidad (Ecuación 2), especialmente si son los únicos ingredientes a ser estudiados en las diferentes mezclas. Si la suma de las proporciones de los componentes es menor que la unidad, por ejemplo, si la suma es igual a 0,8 porque el 0,20 de la mezcla se mantiene constante, y se desea trabajar sólo con las proporciones variables que suman 0,80, entonces dichas proporciones deben ser escritas como fracciones escaladas, de tal forma que estas sumen la unidad (Cornell, 2002).

Claramente si se hace que q represente el número de ingredientes (o constituyentes) en el sistema bajo estudio, y se representa la proporción del i -ésimo componente en la mezcla por x_i , entonces tenemos las siguientes dos ecuaciones (Cornell, 2002):

$$x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, q \quad (1) \quad \text{y} \quad \sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1,0 \quad (2)$$

En realidad, dado que en la Ecuación 2 una proporción individual x_i puede ser uno, una mezcla podría ser un solo ingrediente o constituyente. Tal mezcla es llamada *mezcla pura* o mezcla de “un solo componente”. Las mezclas de un solo componente son usadas principalmente como un punto de referencia o estándar contra el cual son comparadas las mezclas o combinaciones de múltiples componentes (Cornell, 2002).

En virtud de las restricciones sobre los x_i mostradas en las ecuaciones 1 y 2, la descripción geométrica del espacio factorial que contiene a los q componentes, estará compuesta por todos los puntos ubicados sobre o dentro de los límites (vértices, lados, caras, etc.) de una figura geométrica regular de “ q ” vértices (denominada *simplex*), de $(q-1)$ dimensiones (Cornell 2002).

Para dos componentes ($q = 2$), el espacio simplex factorial es una línea recta. Con tres componentes ($q = 3$), el espacio simplex factorial es un triángulo equilátero, y para $q = 4$, la región simplex es un tetraedro. La Figura 2 muestra el espacio simplex factorial para tres componentes (1, 2 y 3), cuyas proporciones están denotadas por x_1 , x_2 y x_3 (Cornell 2002).

El sistema de coordenadas usado para los valores de x_i , $i = 1, 2, \dots, q$, se denomina *sistema simplex coordinado*, donde la suma de x_i 's suma uno. Con tres componentes, por ejemplo, los vértices del triángulo representan mezclas de componentes puros y están denotados por $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ y $(0, 0, 1)$, es 1 para un componente en particular y 0 para los demás componentes. El interior de los puntos del triángulo representan mezclas en las cuales ninguno de los componentes está ausente, es decir x_1 , x_2 y x_3 son mayores a cero.

En la Figura 3 muestra las coordenadas del simplex para el punto central (centroide) que contiene iguales proporciones de los tres componentes $(1/3, 1/3, 1/3)$. Los puntos medios de los lados representan puntos binarios. Los puntos interiores del triángulo representan los 3 componentes.

Existen situaciones en las que uno no se encuentra en libertad de explorar el *simplex* en su totalidad, debido a ciertas restricciones adicionales consideradas

sobre las proporciones de los componentes. La limitación de la experimentación a una sub región del *simplex* puede darse considerando restricciones relacionadas con los límites inferiores, superiores o incluso de ambos tipos. Si alguna parte del *simplex* es la región a la que uno se confina, y si se es capaz de escoger el diseño y modelos adecuados para dicha sub región, existirá una disminución de costos y tiempo de experimentación; así como un incremento en la precisión de los estimadores del modelo (Cornell, 2002).

Es frecuente encontrar situaciones en las que existen, en forma simultánea, límites inferiores y/o superiores para cada componente integrante de la mezcla. Esta situación se da cuando, por ejemplo, para formar una mezcla se requiere o necesita como mínimo L_i , pero no más de U_i , del componente i (situación representada en la Ecuación 3) y así sucesivamente con algunos o todos los demás componentes (Cornell, 2002).

Con q componentes, las restricciones múltiples son escritas como:

$$0 \leq L_i \leq x_i \leq U_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, q \quad (3)$$

Cuando solamente una o dos de las proporciones de los componentes están restringidas en valor, la apreciación de la forma del espacio factorial resultante nos ofrece menores dificultades. Sin embargo, si casi todas las proporciones de los componentes están restringidas, tanto inferior como superiormente, el espacio factorial resultante toma la forma de un hiperpoliedro convexo que, por lo general, tiene la forma considerablemente más complicada que el *simplex* (Cornell, 2002).

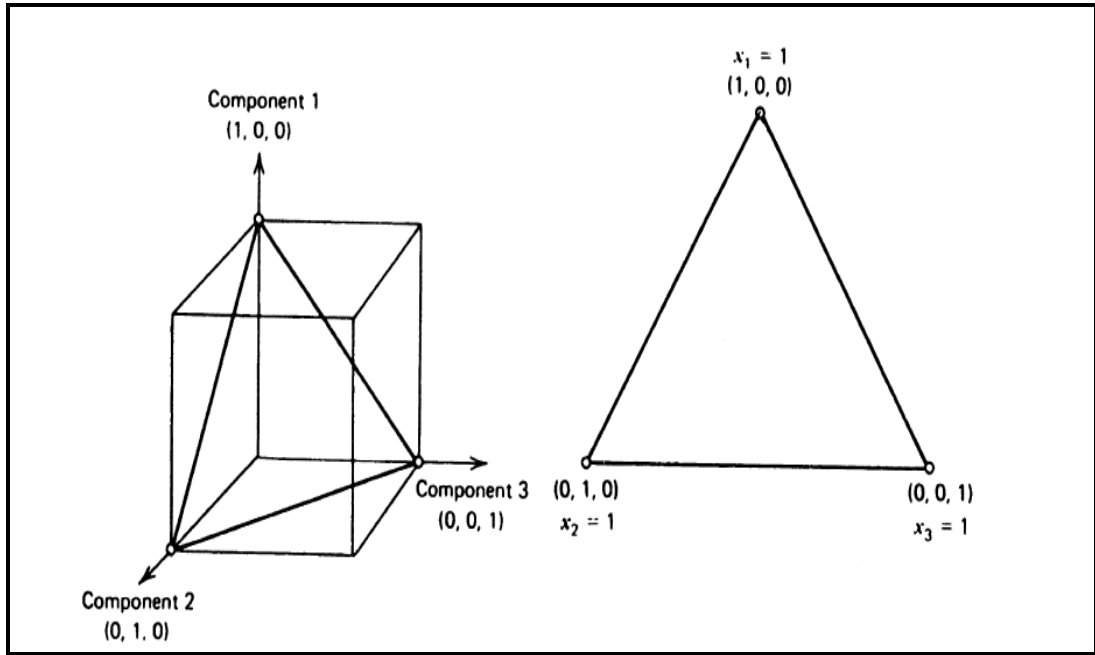


Figura 2: Región Simplex para tres componentes. Todos las mezclas experimentales deben ubicarse sobre o dentro del triángulo cuya ecuación es $x_1 + x_2 + x_3 = 1$.

FUENTE: Cornell (2002).

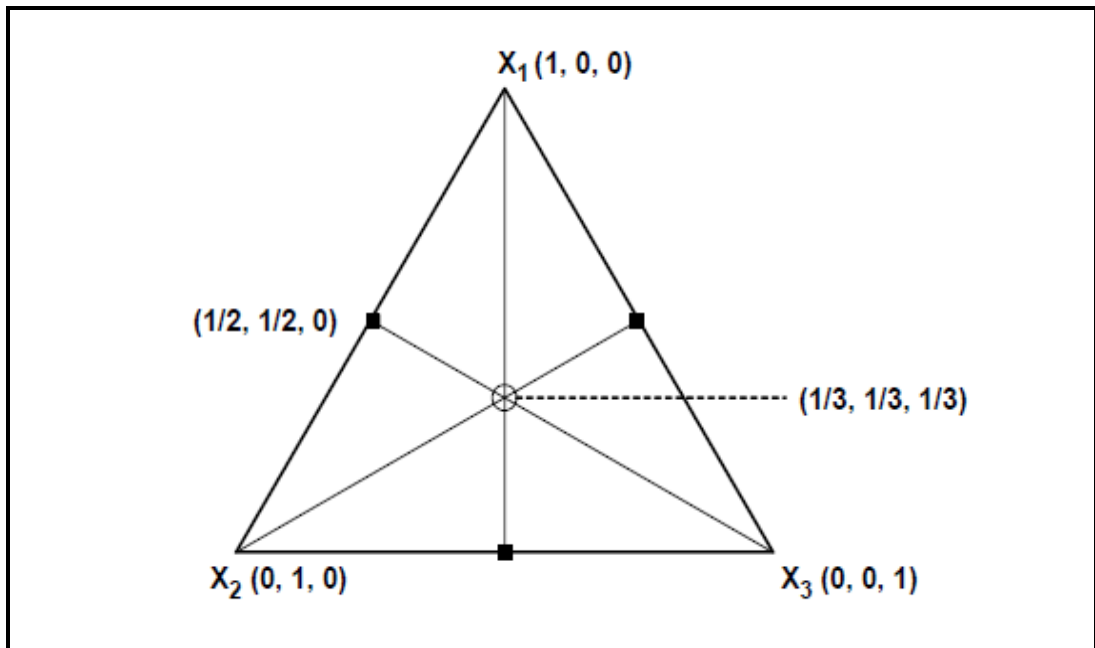


Figura 3: Diseño Triangular para mezclas de 3 componentes.

FUENTE: Bondari (2005).

2.4.1. ASPECTOS GENERALES SOBRE LOS MÉTODOS DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Según Cornell (2002), en muchos de los trabajos experimentales que envuelven mezclas multicomponentes; el énfasis está dado sobre las características físicas, tales como la forma o el punto máximo, de la superficie de respuesta.

Por ejemplo, asúmase que se está elaborando una bebida energizante mediante la mezcla de determinadas proporciones de jugo de naranja, jugo de piña y jugo de uva. La respuesta de interés es el sabor frutal de dicha bebida, cuantificado en una escala de 1 a 9, donde 1 = no frutal, 5 = promedio, 9 = extremadamente frutal. Si la respuesta medida (puntaje de sabor) para cualquier mezcla pudiera ser representada por la altura perpendicular sobre la mezcla cuyas coordenadas están localizadas dentro o sobre los límites del triángulo, entonces el lugar geométrico de los valores del sabor de todas las mezclas puede ser visualizada como una superficie encima del triángulo. Dicha superficie, la cual se asume como continua para todas las posibles mezclas de jugo es presentada en la Figura 4 y los contornos de la superficie estimada del sabor, son mostrados en la Figura 5.

Geoméricamente cada curva de contorno en la Figura 5, es una proyección de una sección transversal de la superficie de sabor, hecha por un plano paralelo al triángulo que corta a través de la superficie a una altura determinada. Como se observa, las alturas de los planos de intersección de corte que generan las curvas de nivel (contorno) oscilan entre 5,8 y 6,8.

Las principales consideraciones relacionadas con la exploración de la superficie de respuesta sobre la región simplex son, según Cornell (2002):

- La elección de un modelo matemático apropiado que describa aproximadamente la superficie de respuesta sobre la región de interés.
- La evaluación de la suficiencia del modelo para representar la superficie de respuesta.
- Un diseño apropiado para recolectar las observaciones, ajustar el modelo y evaluar la suficiencia de ajuste.

Para este fin, se asume que existe alguna relación funcional (Ecuación 4), que en teoría, describe exactamente la superficie de respuesta (Cornell, 2002).

$$\eta = \varnothing (x_1, x_2, \dots, x_q) \quad (4)$$

“ η ” denota el valor de la respuesta, que es dependiente de las proporciones x_1, x_2, \dots, x_q de los componentes. Una asunción muy básica que se tiene que hacer aquí es que la superficie de respuesta, representada por la función \varnothing , es descrita como una función continua en las $x_i, i = 1, 2, \dots, q$. El problema de asociar la forma de la superficie de respuesta con la composición de ingredientes se centra en determinar la ecuación matemática que represente adecuadamente la función $\varnothing(\cdot)$ de la Ecuación 4 (Cornell, 2002).

En general para representar $\varnothing (x_1, x_2, \dots, x_q)$ se utilizan las funciones polinomiales. La justificación es que uno puede expandir $\varnothing (x_1, x_2, \dots, x_q)$ usando una serie de Taylor, y por lo tanto, puede utilizarse un polinomio con una aproximación.

Normalmente un polinomio de primer grado (Ecuación 5) o de segundo grado (Ecuación 6), son el tipo de modelo adecuado para representar la superficie. Las ecuaciones polinómicas de bajo grado son más convenientes de manejar en comparación con las ecuaciones de grados más altos, debido a que los polinomios de más bajo grado contienen pocos términos y por ello, requieren valores observados de la respuesta para estimar los parámetros de la ecuación (Cornell, 2002).

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i X_i \quad (5)$$

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i X_i + \sum_{i=1}^q \sum_{i \leq j}^q \beta_{i,j} X_i X_j \quad (6)$$

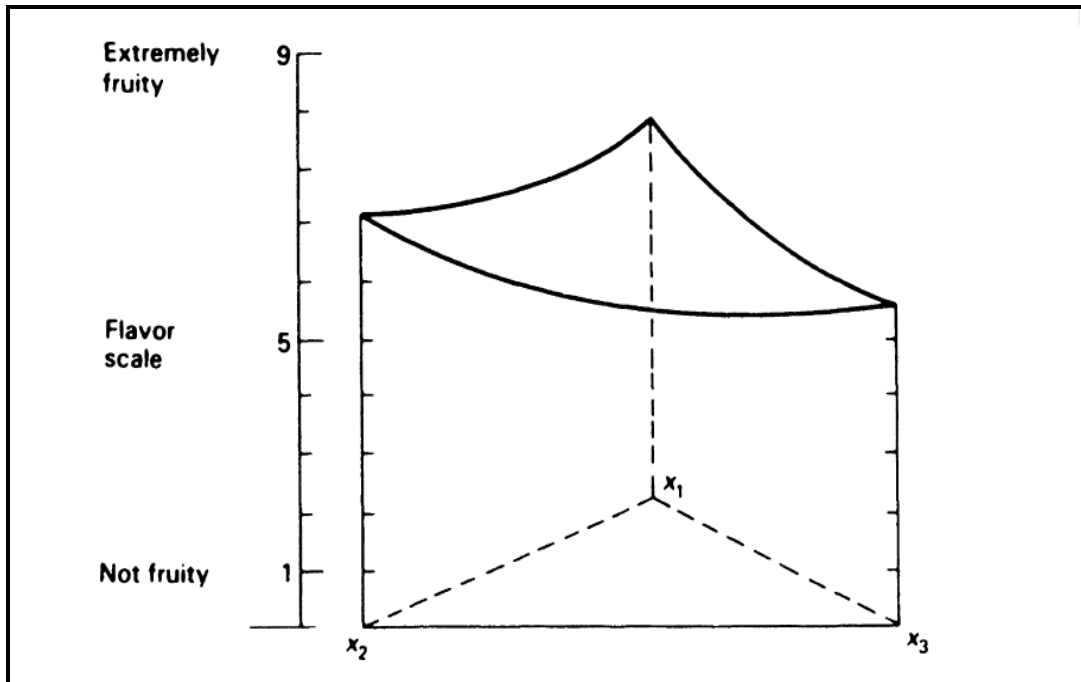


Figura 4: Superficie de sabor frutado del jugo de frutas.

FUENTE: Cornell (2002).

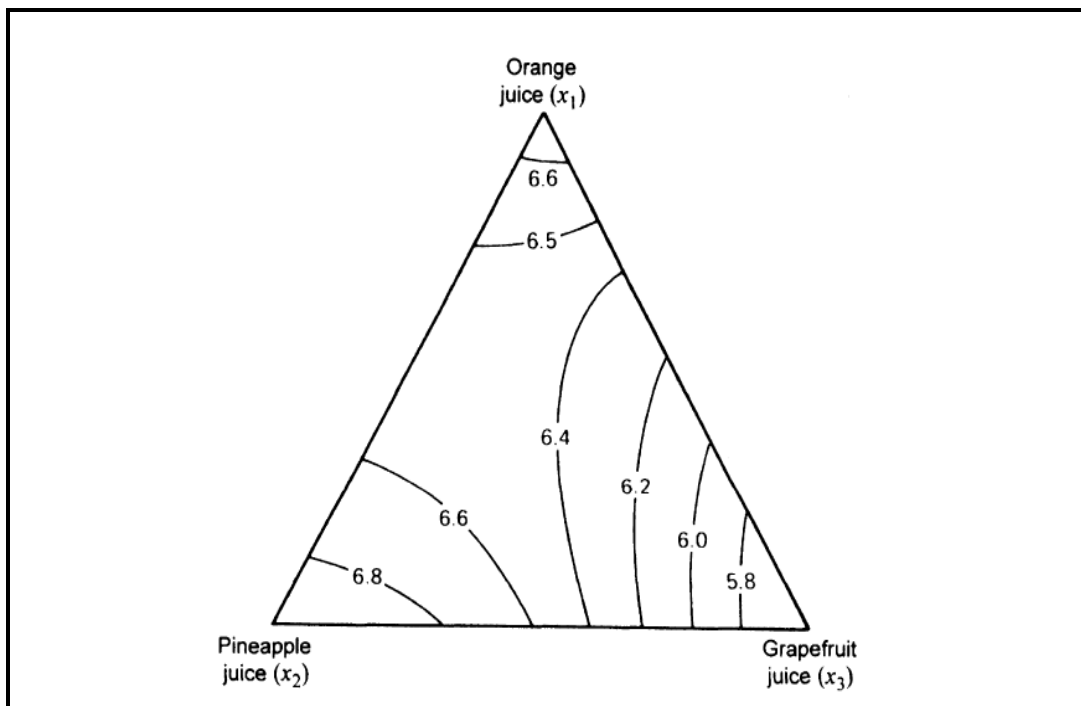


Figura 5: Contornos de la superficie de sabor frutado del jugo de frutas.

FUENTE: Cornell (2002).

Con la finalidad de aproximar la relación funcional $\eta = \mathcal{O}(x_1, x_2, \dots, x_q)$ con un polinomio o cualquier otra forma de ecuación o modelo, se realizan algunas corridas experimentales pre seleccionadas, en varias combinaciones pre determinadas de las proporciones (o mezclas de ingredientes) es referido como el “diseño experimental”. Una vez que el número adecuado de observaciones es recolectado, los parámetros del modelo son estimados por el método de mínimos cuadrados (Cornell, 2002).

2.4.2. TÉCNICA PARA MEDIR EL EFECTO DE COMPONENTES EN ZONAS EXPERIMENTALES DE MEZCLAS CON RESTRICCIONES SOBRE LOS COMPONENTES

Según Cornell (2002) cuando las proporciones de los componentes de la mezcla están restringidas por límites inferiores y superiores de la forma $0 \leq L_i \leq x_i \leq U_i \leq 1$, los rangos $R_i = U_i - L_i$, $i = 1, 2, \dots, q$, rara vez son iguales, o incluso cercanos entre ellos. Rangos desiguales producen valores desiguales de los errores estándar de los coeficientes estimados. Adicionalmente, muy a menudo el centroide de la región restringida es diferente del centroide simplex; por ello, las direcciones dispuestas por los ejes de los componentes pueden no ser las mejores para medir los efectos de los componentes.

Cuando se mide el efecto del componente i y se usa una mezcla de referencia diferente al centroide del *simplex*, es más apropiada una dirección alternativa a la definida por el eje del i -ésimo componente. Esta dirección alternativa es una línea imaginaria proyectada desde la mezcla de referencia (la cual es usualmente el centroide de la región restringida) hacia el vértice $x_i = 1$. Tal dirección, que es usada para medir el efecto del componente 1, está representada por la línea discontinua en la Figura 6. La mezcla de referencia en la Figura 6 es el centroide $(x_1, x_2, x_3) = (0,25, 0,70, 0,05)$ de la región definida por las restricciones $0,1 \leq L_i \leq 0,4$, $0,5 \leq x_2 \leq 0,9$ y $0 \leq x_3 \leq 0,1$.

A lo largo de la línea discontinua en la Figura 6, conforme el valor de x_i se incrementa (o decrece), los valores de x_2 y x_3 decrecen (o se incrementan), pero la

razón de x_2 sobre x_3 ($0,70/0,05 = 14,1$) permanece constante. Por ello esta dirección permite medir el efecto de un componente como si se tratase del caso de un *simplex* y no de una región restringida. Esta dirección fue introducida por Cox en 1971, cuando él sugirió que se podía utilizar de una forma de modelo alternativo a los de Scheffé para medir los efectos de los componentes. Por tal motivo, esta nueva dirección es denominada como “dirección o trazo de Cox” (Cornell, 2002).

Cornell (2002) indica que una medida de la cantidad de cambio en cada uno de los componentes restantes, cuando un cambio de tamaño Δ_i es hecho en la proporción del componente i , es determinado de la siguiente manera:

Si se denota las proporciones de los q componentes en la mezcla de referencia como $S = (S_1, S_2, \dots, S_q)$, donde $S_1 + S_2 + \dots + S_q = 1$. Entonces, si la proporción del componente i en S_i es ahora cambiado en una cantidad Δ_i (donde Δ_i puede ser > 0 o < 0) en la dirección de Cox, entonces la nueva proporción se convierte en la Ecuación 7.

$$x_i = S_i + \Delta_i \quad (7)$$

Luego las proporciones de los $q-1$ componentes restantes, resultantes del cambio presentado por la Ecuación 7, a partir de S_i en el i -ésimo componente, son:

$$x_j = s_j - \frac{\Delta_i s_j}{(1 - s_i)} \quad , \text{ lo que es lo mismo:}$$

$$x_j = s_j \left(\frac{1 - s_i - \Delta_i}{1 - s_i} \right), \quad j = 1, 2, \dots, q; \quad j \neq i \quad (8)$$

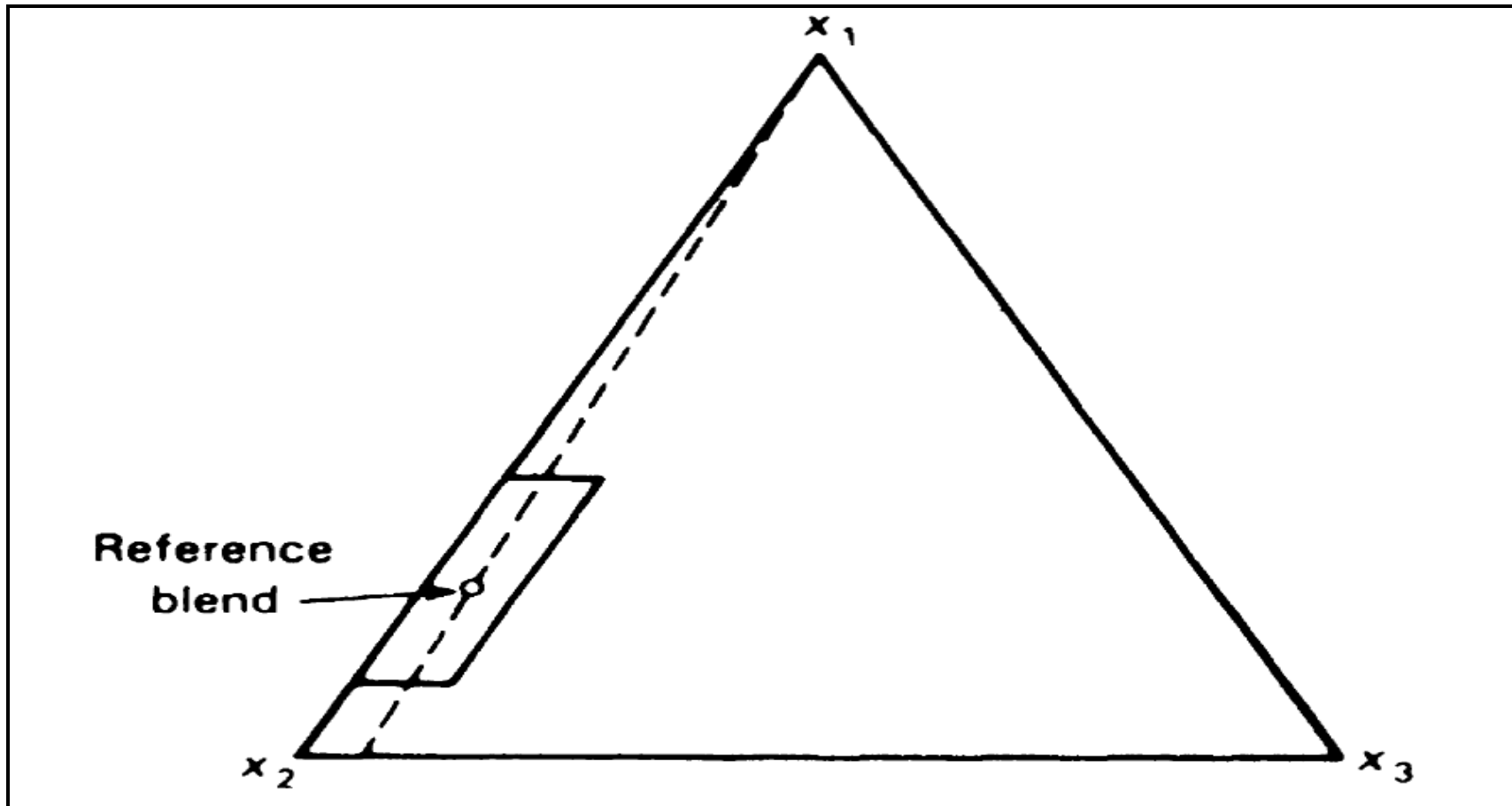


Figura 6: Dirección indicada por la línea punteada para medir el efecto del incremento de la proporción x_1 del componente 1.

FUENTE: Cornell (2002).

La cantidad $1 - S_i$ en el denominador de la Ecuación 8 es el máximo valor positivo que Δ_i puede tomar. El cambio Δ_i puede ser negativo, lo cual ocurre en el caso de que el cambio se dé desde la mezcla de referencia hacia un punto cada vez más lejano del vértice $x_i = 1$. Cuando esto ocurre, el máximo valor de Δ_i es $-S_i$. Nótese que la razón de las proporciones de los componentes j y k , donde x_j y x_k están definidos por la Ecuación 8, está representada en la Ecuación 9:

$$\frac{x_j}{x_k} = \frac{s_j(1 - s_i - \Delta_i)}{s_k(1 - s_i - \Delta_i)} \quad (9)$$

Sustituyendo la Ecuación 7 en 9, se tiene la Ecuación 10:

$$\frac{x_j}{x_k} = \frac{s_j(1 - x_i)}{s_k(1 - x_i)} = \frac{s_j}{s_k} \quad (10)$$

Lo cual es la misma razón de los componentes j y k en la mezcla de referencia s . En otras palabras, cuando la proporción del componente i cambia de s_i a $x_i = s_i + \Delta_i$, el cociente de las proporciones de los componentes j y k ; $k \neq i$, continúa siendo el mismo de lo que era en s (Cornell, 2002).

2.4.3. GRAFICANDO EL TRAZO DE LA RESPUESTA

El trazo de la respuesta es un gráfico de los valores de la respuesta estimada, usando el modelo ajustado, a lo largo de las direcciones definidas por las Ecuaciones 8 y 9. Los pasos a llevar a cabo para construir los trazos de la respuesta, son los siguientes (Cornell, 2002):

- **Paso 1:** Elegir la forma del modelo que mejor se ajuste y con el que se sienta cómodo de realizar predicciones de la respuesta sobre la región experimental.

- **Paso 2:** Seleccionar una mezcla de referencia. Generalmente esta será el centroide de la región experimental.
- **Paso 3:** Sobre la línea de x_i , incrementar el componente i en una cantidad de Δ_i , usando la dirección de Cox, mediante el alejamiento desde la mezcla de referencia ($\Delta_i > 0$) hacia el vértice $x_i = 1$, así tan lejos como desde ($\Delta_i < 0$) el vértice. Mantenga las proporciones de los otros componentes en las mismas proporciones como en la mezcla de referencia s (ver Ecuación 8). Para cada valor de i , un conjunto de coordenadas define una mezcla sobre la línea de x_i .
- **Paso 4:** Substituir las coordenadas de cada mezcla, generadas en el paso 3, en el modelo ajustado para obtener los valores de la respuesta predicha a lo largo de la línea x_i . Repetir el paso 3 y 4 en las otras líneas de $x_j, j = 1, 2, \dots, q; j \neq i$.
- **Paso 5:** Graficar los valores de las respuestas predichas versus los cambios hechos en x_i para cada $i, i = 1, 2, \dots, q$. Existirán q gráficos.

Para entender los pasos indicados anteriormente, se tiene el siguiente ejemplo el cual permite visualizar cómo se van obteniendo los datos hasta obtener el trazo de la respuesta o Trazo de Cox (Cornell, 2002):

En la formulación de vinil usado para las fundas de asientos de autos, tres plastificantes (P_1, P_2 y P_3) componen el 79,5 por ciento de la formulación. Del 79,5 por ciento, los plastificantes están restringidos por los siguientes límites, los cuales divididos entre 79,5 por ciento me dan las proporciones ($x_i = P_i/79,5$):

(11)	(12)
$32,5 \% \leq P_1 \leq 67,5 \%$	$0,409 \leq x_1 \leq 0,849$
$0 \% \leq P_2 \leq 20 \%$	$0,00\% \leq x_2 \leq 0,252$
$12 \% \leq P_3 \leq 21,8 \%$	$0,151 \leq x_3 \leq 0,274$

La región experimental acorde a las proporciones de los componentes se muestra en la Figura 7. Se observa también que hay nueve mezclas definidas por los cuatro vértices extremos de la región, los puntos medios de los cuatro bordes de la región y el centroide general de la región restringida. La variable respuesta es el espesor del vinyl en milímetros. Las nueve mezclas fueron elegidas en orden de ajustarse a un modelo cuadrático en x_1, x_2 y x_3 .

El modelo cuadrático en las proporciones de plastificantes es:

$$Y(x) = -50,1x_1 - 282,2x_2 - 911,6x_3 + 317,4x_1x_2 + 1464,3x_1x_3 + 1846,2x_2x_3 \quad (13)$$

Para obtener gráficas de la variable respuesta predicha usando el modelo de la Ecuación 13, primero el centroide general (o mezcla 5) cuyas coordenadas son (0,6615; 0,1260; 0,2125) es elegido como la mezcla de referencia. Segundo, las direcciones de los trazos están definidas por las líneas dibujadas desde el centroide a cada vértice del triángulo como se observa por las líneas punteadas en la Figura 7. Para este ejemplo se considera que los incrementos $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 0,02$.

Considere una mezcla a lo largo de la línea x_1 en la cual la proporción del componente 1 es incrementada en 0,02 por encima del punto de referencia (también llamado centroide); entonces se tiene que x_1 pasa de 0,6615 a 0,6815; y la proporción $x_2 + x_3$ decrece en 0,02. Asimismo, a lo largo de la línea x_1 , la relación de x_2/x_3 se mantiene constante e igual a la relación $s_2/s_3 = 0,5929$. Las coordenadas del primer punto sobre la línea x_1 serían:

$$x_1 = 0,6615 + 0,02 = 0,6815 \quad x_2 = 0,1260 - \frac{0,02(0,1260)}{0,3385} = 0,1186$$

$$x_3 = 0,2125 - \frac{0,02(0,2125)}{0,3385} = 0,1999 \quad x_2/x_3 = 0,1186/0,1999 \approx 0,5929$$

Cuando estos valores de x_1 , x_2 y x_3 se sustituyen en la Ecuación 13, se tiene el valor estimado o predicho de espesor $\hat{y} = 19$. Del mismo modo proseguimos con el segundo punto y demás:

$$x_1 = 0,6615 + 2(0,02) = 0,6815 \quad x_2 = 0,1260 - \frac{0,04(0,1260)}{0,3385} = 0,1111$$

$$x_3 = 0,2125 - \frac{0,04(0,2125)}{0,3385} = 0,1874 \quad Y(x) = 18,3.$$

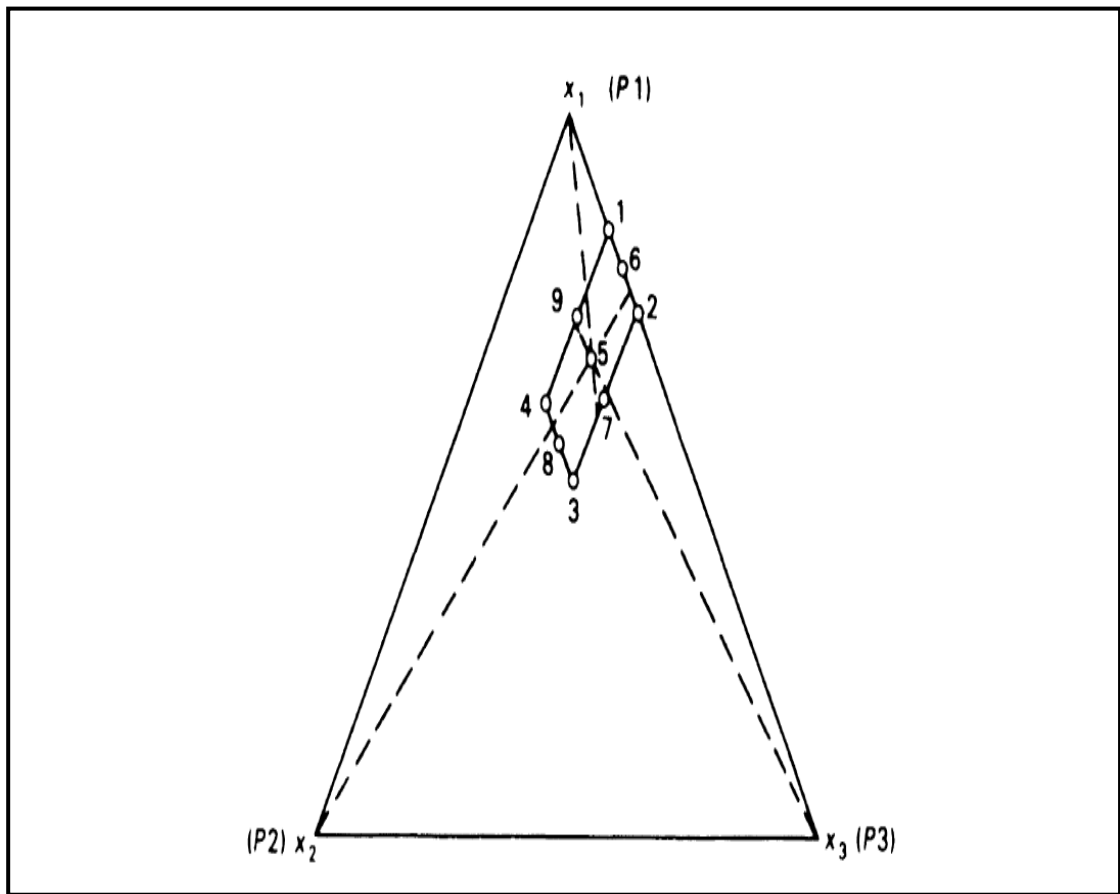


Figura 7: Región experimental del plastificante definido por las restricciones en la Ecuación 12. También se muestran las direcciones de los efectos (líneas punteadas) especificadas por las Ecuaciones 7 y 8.

FUENTE: Cornell (2002).

En la Tabla 8 están listadas las coordenadas y la variable respuesta estimada para nueve mezclas tomadas a lo largo de la línea x_1 , trece mezclas tomadas a lo largo de la línea x_2 y siete mezclas tomadas a lo largo de la línea x_3 . Sólo los puntos de las tres líneas que caen sobre la región restringida de la Figura 7, son de interés. En la Figura 8 los valores estimados del espesor del vinyl usando la Ecuación (13) son graficados para las mezclas definidas sobre cada una de las tres líneas. Los valores a lo largo de la abscisa, en la Figura 8, representa las desviaciones respecto de la mezcla de referencia, medidas a lo largo de la línea x_i , $i = 1, 2, 3$. Esta gráfica es generada por el *Software Design Expert*[®] de la corporación *Stat – Ease* (Cornell, 2002).

En la Figura 8, los trazos de la respuesta o trazos de Cox; ilustran el efecto de incrementar las proporciones de los 3 plastificantes, en la manera discutida previamente, sobre el espesor estimado del vinyl; a medida que uno se aleja de la mezcla de referencia (0,6615, 0,1260, 0,2125) en las direcciones mostradas en la Figura 7. La Figura 8 muestra en general, una caída en el espesor a medida que uno se aleja del punto de referencia, a excepción de cuando se mueve ligeramente en la dirección del vértice P_2 , donde el espesor estimado se incrementa también ligeramente.

El espesor máximo estimado ($\hat{y} = 19.55$) aparece a lo largo de la línea x_2 (trazo B), aproximadamente en la coordenada ($x_1, x_2, x_3 = 0,6388, 0,156, 0,2051$) (Cornell, 2002).

La naturaleza parabólica de las tres curvas en la Figura 8, significa que el valor estimado del espesor del vinyl es muy sensible a los cambios que son hechos en los plastificantes por separado. Si una de las curvas hubiese sido una línea horizontal, por ejemplo, donde el espesor del vinyl no cambiase con los cambios en la x_i específica, esto implicaría que el espesor del vinyl sería insensible (o robusto) a los cambios en la proporción del i -ésimo plastificante. Cuando esto sucede, se dice que se ha detectado un ingrediente inactivo.

Tabla 8: Coordenadas de las mezclas y espesor del vinil estimado de las mezclas tomadas a lo largo de las tres líneas de la Figura 7.

Dirección Componente 1				Dirección Componente 2				Dirección Componente 3			
x ₁	x ₂	x ₃	\hat{y}	x ₁	x ₂	x ₃	\hat{y}	x ₁	x ₂	x ₃	\hat{y}
0,5815	0,1558	0,2627	15,4	0,7523	0,006	0,2417	10,6	0,7119	0,1356	0,1525	14,8
0,6015	0,1483	0,2502	17,1	0,7372	0,026	0,2368	12,9	0,6951	0,1324	0,1725	17,5
0,6215	0,1409	0,2376	18,3	0,722	0,046	0,2320	14,8	0,6783	0,1292	0,1925	19,0
0,6415	0,1334	0,2251	19,0	0,7069	0,066	0,2271	16,4	*0,6615	0,1260	0,2125	19,3
*0,6615	0,126	0,2125	19,3	0,6918	0,086	0,2222	17,7	0,6447	0,1228	0,2325	18,4
0,6815	0,1186	0,1999	19,0	0,6766	0,106	0,2174	18,7	0,6279	0,1196	0,2525	16,3
0,7015	0,1111	0,1874	18,3	*0,6615	0,126	0,2125	19,3	0,6111	0,1164	0,2725	13,1
0,7215	0,1037	0,1748	17,1	0,6464	0,146	0,2076	19,5				
0,7415	0,0962	0,1623	15,4	0,6312	0,166	0,2028	19,5				
				0,6161	0,186	0,1979	19,1				
				0,6010	0,206	0,1930	18,3				
				0,5858	0,226	0,1882	17,3				
				0,5707	0,246	0,1833	15,8				

Nota: *Estas son coordenadas de la mezcla de referencia.

$${}^a_{x_2/x_3} = 0,5929 = s_2/s_3$$

$${}^b_{x_1/x_3} = 3,1129 = s_1/s_3 \quad {}^c_{x_1/x_2} = 5,25 = s_1/s_2$$

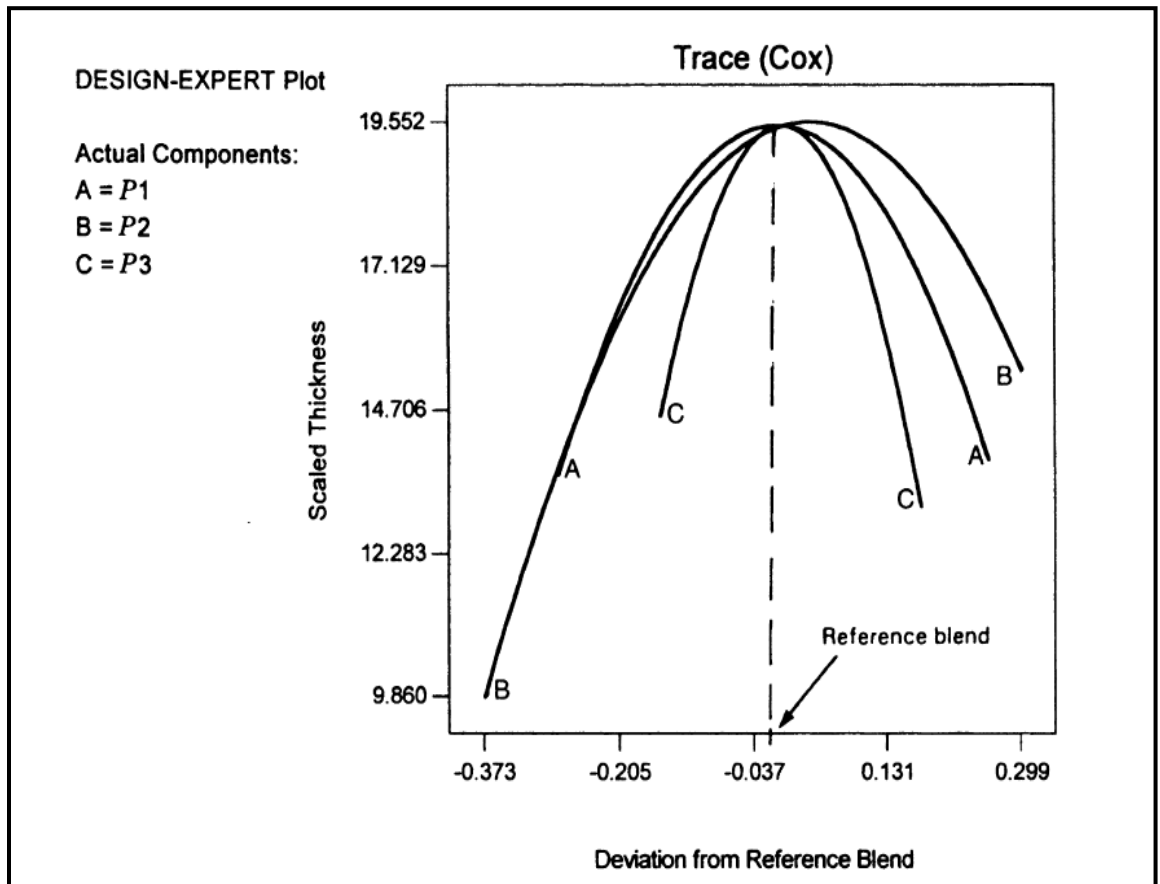


Figura 8: Gráfica de los valores de espesor de vinyl estimados a lo largo de cada una de las líneas de los componente x_i , $i = 1, 2, 3$; llamados trazos o direcciones de Cox, usando la Ecuación 13. El gráfico fue generado con el software *Design Expert*[®] de *Stat-Ease* (1998).

FUENTE: Cornell (2002).

2.4.4. OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA DE RESPUESTAS

Un problema común en el desarrollo de un producto es aquel que envuelve la determinación de un conjunto de condiciones (componentes o variables independientes), el cual resulte en un producto con una combinación deseable de propiedades (las variables respuestas) (Derringer y Suich, 1980).

El enfoque de la función de deseabilidad para realizar la optimización simultánea de múltiples ecuaciones fue inicialmente descrita por Harrington (1980). En esencia el enfoque consiste en transformar las funciones a una escala común ([0,1]), combinándose entre ellas por medio de la media geométrica y optimizando la métrica general. Las ecuaciones pueden representar modelos predictivos u otras ecuaciones (Kuhn, 2014).

Cuando varias características o respuestas y_1, y_2, \dots, y_k han sido modeladas, considerando las proporciones del mismo grupo de q componentes, se tienen por lo general la forma de una función polinomial representada en la Ecuación 14:

$$\hat{Y}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_q) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

La función de deseabilidad involucra la transformación de cada una de las variables respuesta estimadas \hat{Y} a un valor de deseabilidad d_i , donde $0 \leq d_i \leq 1$. Los valores individuales de d_i son combinados entre ellos por medio del promedio geométrico, para dar el valor de Deseabilidad Global (D) representado en la Ecuación 15 (Derringer y Suich, 1980).

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_k)^{1/k} \quad (15)$$

El valor de D cae en el rango de [0,1] y será mayor a medida que el balance de las propiedades se vuelva más favorable; por lo que si $D = 0$; entonces el producto es inaceptable.

Cuando se trata de transformaciones por un solo lado, son posibles varias opciones de optimización, como las que se presentan a continuación y que son graficadas en la Figura 9 (Derringer y Suich, 1980):

- Para la maximización de \hat{Y}_i :

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_i \leq Y_{i*} \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - Y_{i*}}{Y_i^* - Y_{i*}} \right]^r & \text{si } Y_{i*} \leq \hat{Y}_i \leq Y_i^* \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_i \geq Y_i^* \end{cases} \quad (16)$$

- Para la minimización de \hat{Y}_i :

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_i \geq Y_i^* \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - Y_i^*}{Y_{i*} - Y_i^*} \right]^r & \text{si } Y_{i*} \leq \hat{Y}_i \leq Y_i^* \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_i \leq Y_{i*} \end{cases} \quad (17)$$

A modo de explicación, para el caso de la maximización, el valor de Y_{i*} es el valor mínimo aceptable de \hat{Y}_i . El usuario especifica este valor de Y_{i*} , sabiendo que cualquier valor por debajo de \hat{Y}_i resultaría en un producto inaceptable, ya que si $\hat{Y}_i \leq Y_{i*}$ haría a $d_i = 0$ y por lo tanto $D = 0$. El valor de Y_i^* es el máximo valor de \hat{Y}_i . Cabe mencionar que, la minimización de \hat{Y}_i es equivalente a la maximización de $-\hat{Y}_i$ (Derringer y Suich, 1980).

El valor de r usado en la transformación será especificado por el usuario. En la Figura 9, un gran valor de r sería especificado si fuera muy deseable que el valor de \hat{Y}_i incremente rápidamente por encima de Y_{i*} . En otras palabras, aun cuando Y_{i*} fuera un valor aceptable, la deseabilidad del producto sería incrementada teniendo a \hat{Y}_i considerablemente mayor a Y_{i*} .

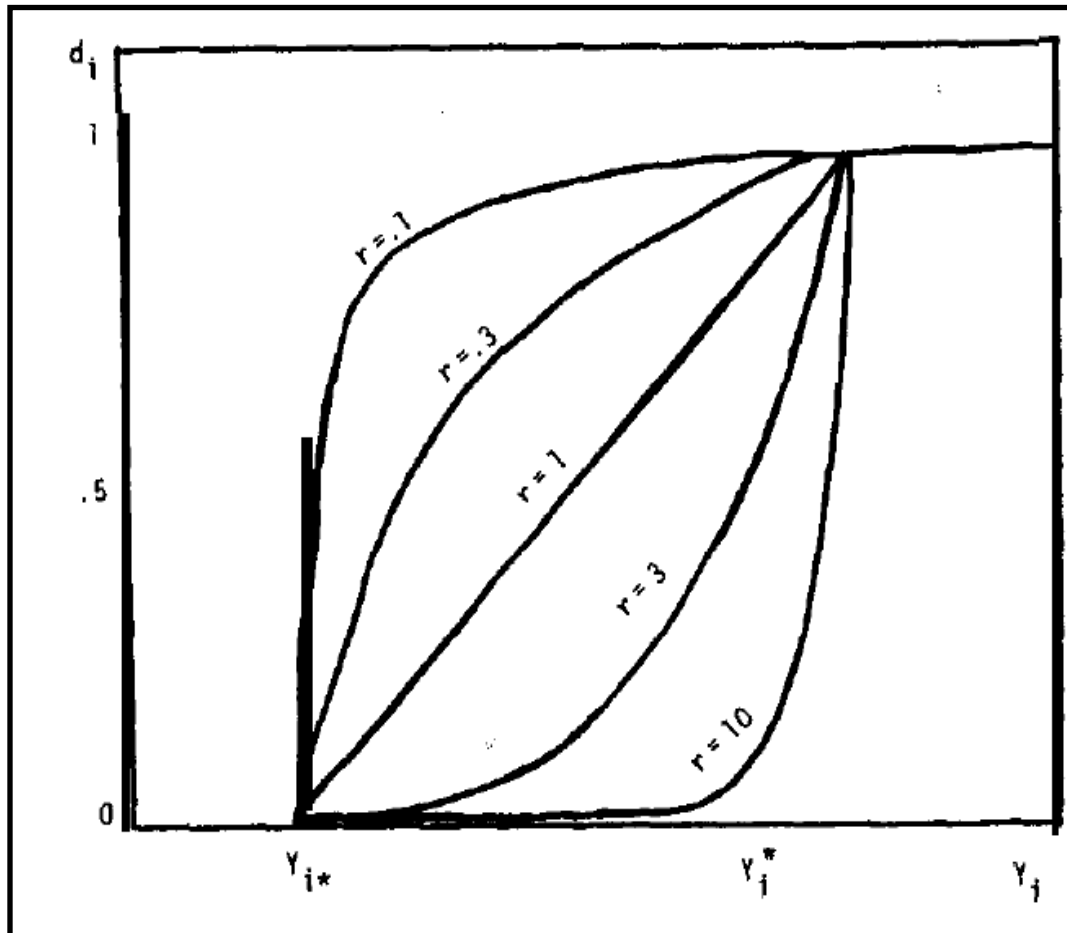


Figura 9: Gráfico de la función deseabilidad de un lado, para varios valores de r .

FUENTE: Cornell (2002).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El trabajo de investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Industrias Alimentarias, de la Universidad Nacional Agraria La Molina: laboratorio de Envases y Embalajes, laboratorio de Físico Química, laboratorio de Microbiología y el laboratorio de Investigación.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1. MATERIA PRIMA

Se empleó fresas (*Fragaria anassa* L.) del cultivar “Aromas” procedente de la provincia de Huaral y que fueron adquiridas en el mercado mayorista N° 2 de frutas. Los frutos provinieron de un mismo campo de cultivo, en un estado de madurez visual del 75 por ciento, lo cual significa que las tres cuartas partes de la superficie del fruto eran de color rojo; según lo recomendado por Saavedra y Algecira (2010).

3.2.2. INSUMOS

- Agua destilada de Aquality.
- Cera de abeja natural.
- Glicerol grado USP de Insuquímica.
- Goma de tara en polvo grado USP de Somerex.
- Hipoclorito de sodio Clorox®.

- Tween 80 (mono oleato de sorbitán) de Insuquímica.

3.2.3. MATERIALES Y EQUIPOS

- Agitador magnético con calentador Jenway® 1000.
- Analizador de gases *Pac Check*® Modelo 325, marca Mocon®
- Analizador de textura modelo QTS *twenty five*, marca CNS Farnell.
- Balanza Analítica H.W. Kessel S.A. (Capacidad = 210 g, precisión = 0,1 mg).
- Balanza de precisión digital Ohaus® (Capacidad = 3100 g, precisión = 0,01 g).
- Bandejas PET (Polietileno Tereftalato) con perforaciones, de 500 g de capacidad.
- Cámara de temperatura y humedad relativa controlada marca Climacell.
- Charolas de acero inoxidable.
- Colorímetro Minolta, Modelo CR-400 (Minolta, Japón).
- Potenciómetro marca Orion.
- Refractómetro ABBE.
- Termómetro de alcohol (rango de -10 a 100 °C).
- Tinas de plástico.
- Vernier

3.3. MÉTODOS DE ANÁLISIS

3.3.1. ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS

Las fresas fueron caracterizadas de acuerdo a:

- **Acidez**

Método del electrodo de vidrio para cuantificar la acidez titulable expresada como gramos de ácido cítrico por 100 gramos de fruta. Método 942.15 de la A.O.A.C. (2007).

- **Cenizas**

Método gravimétrico. Método 923.03 de la A.O.A.C. (2007).

- **Carbohidratos**

Cálculo por diferencia (Collazos, 1996).

- **Fibra cruda**

Método 969.09 de la A.O.A.C. (2007).

- **Firmeza**

Se determinó utilizando un analizador de textura y se representó como la fuerza máxima de penetración (gramos fuerza) alcanzada durante la rotura del tejido. Se utilizó una sonda de 6 mm de diámetro. La profundidad de penetración fue de 5 mm y la velocidad de avance de 5 mm/s. Metodología adaptada de Hernández *et al.* (2008).

- **Grasa**

Método de extracción por Soxhlet. Método 920.39 de la A.O.A.C. (2007).

- **Humedad**

Método de secado en estufa hasta peso constante. Método 934.06 de la A.O.A.C. (2007).

- **Índice de madurez**

Se calculó como el cociente entre los sólidos solubles y la acidez cítrica, según Saavedra y Algecira (2010).

- **Luminosidad**

Las mediciones de luminosidad (L^*) se realizaron con un colorímetro Minolta, usando la metodología adaptada de Vargas *et al.* (2006) y Hernández *et al.* (2008).

- **Pérdida de peso**

La pérdida de peso fue expresada como el porcentaje de pérdida de peso respecto al peso inicial total. Metodología según Ribeiro *et al.* (2007); Hernández *et al.* (2008) y Restrepo y Aristizábal (2010).

- **Proteína**

Método de digestión por Kjeldahl. Método A.O.A.C. 920.87 (2007).

- **Potencial de hidrógeno (pH)**

Método 981.12 de la A.O.A.C. (2007), usando un potenciómetro de vidrio.

- **Sólidos solubles totales**

Método para determinar el contenido de sólidos solubles por refractómetro. Método 932.12 de la A.O.A.C. (2007).

- Tasa Respiratoria

La tasa respiratoria o velocidad de respiración de las muestras, se determinó utilizando un analizador de gases en un sistema cerrado, según la metodología de Castelló *et al.* (2006), citado por Pastor (2010).

3.3.2. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Para el recuento de mohos se utilizó el método de recuento por siembra en placa en agar Oxitetraciclina Gentamicina (OGA), recomendado por ICMSF (1985).

3.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.4.1. PREPARACIÓN Y APLICACIÓN DE LAS FORMULACIONES FORMADORAS DE RECUBRIMIENTO

Para la obtención de las formulaciones formadoras de recubrimiento (FFR) se utilizó como matriz soporte la goma de tara, como componente lipídico la cera de abeja y como plastificante el glicerol.

La metodología para la formación de las FFR se basó en la metodología citada por Cerqueira *et al.* (2009), quien formuló recubrimientos en base a galactomananos provenientes de diferentes fuentes, y en base a pruebas experimentales previas desarrolladas en laboratorio. Las soluciones fueron preparadas disolviendo la goma de tara en polvo en agua destilada (80 °C). Luego fue añadido el glicerol y la solución fue agitada con ayuda de un agitador magnético con calentador, hasta que alcanzó 90°C; la cual es una temperatura que asegura la fusión completa de la cera. A dicha temperatura fue añadida la cera de abeja y el surfactante *Tween* 80®, y se homogenizó el sistema por agitación durante una hora. Luego de ello se almacenó en refrigeración hasta su utilización.

En la Figura 10 se presenta el flujo de operaciones para el recubrimiento de las fresas y a continuación se detalla cada una de las operaciones realizadas.

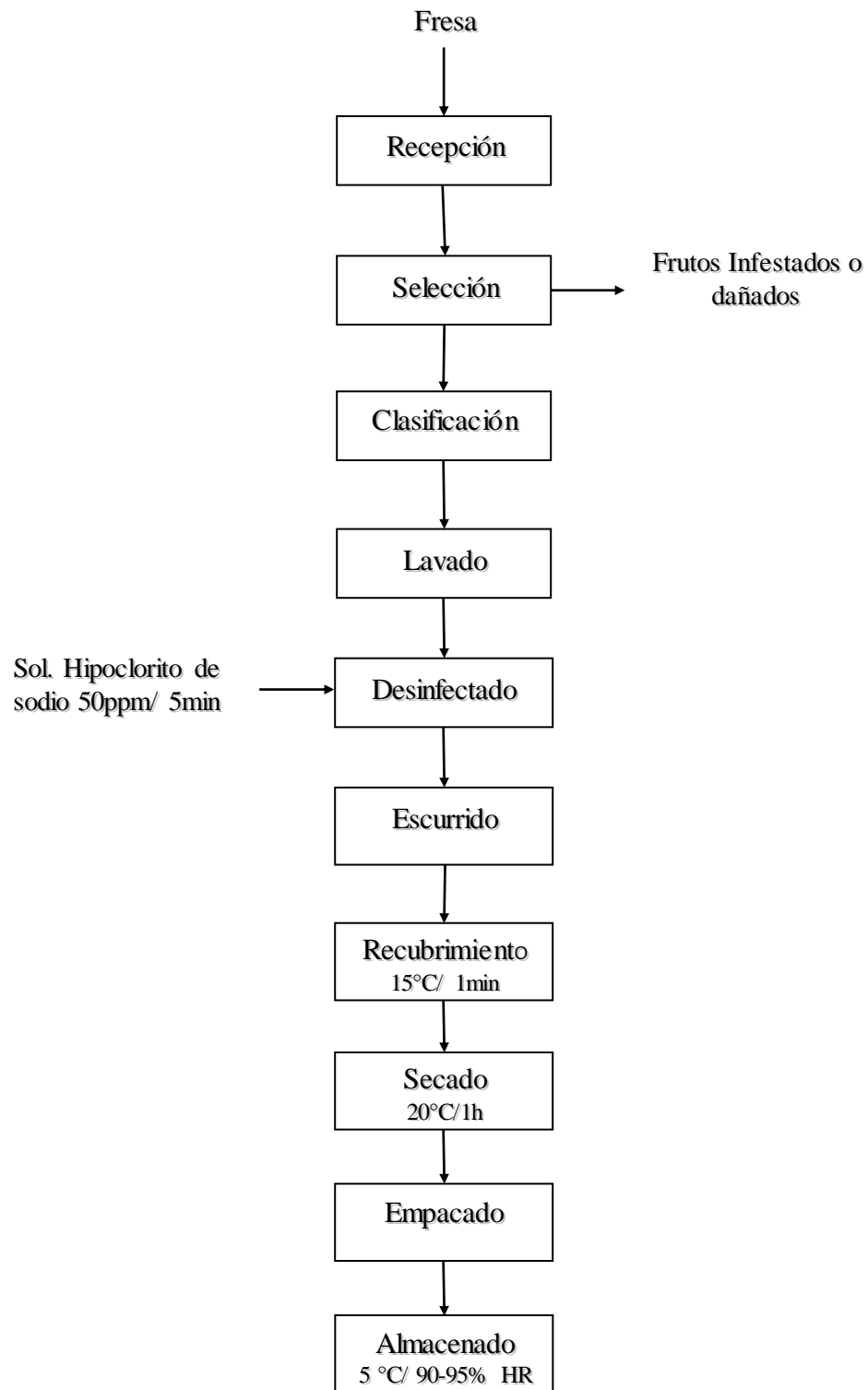


Figura 10: Flujo de operaciones para el recubrimiento de fresas.

a. Recepción

Luego de ser adquiridas, las fresas se mantuvieron en refrigeración (5 °C) hasta antes de darles tratamiento, para reducir los procesos metabólicos y así conseguir un menor arrugamiento del fruto (Almenar, 2005).

b. Selección

Se realizó con el fin de eliminar materia prima en condiciones no deseables. Para ello, se inspeccionaron uno por uno todos los frutos y se seleccionaron sólo aquellos con ausencia de daños mecánicos y/o signos visibles de ataque fúngico (Pastor, 2010).

c. Clasificación

Se realizó con el fin de tener muestras homogéneas en cada uno de los tratamientos. Para ello se clasificaron aquellos frutos que presentaron un diámetro mínimo de 2,6 cm, considerado como calidad de primera en Perú (Espinoza, 2009) y calidad extra en otros países (Diario Oficial de las comunidades Europeas, 2002). El tamaño máximo no difirió en más de 10 mm del diámetro mínimo de la fresa, según lo recomendado por el Codex Alimentarius (1981). Asimismo se clasificaron las que presentaron un color rojo en tres cuartas partes de su superficie.

d. Lavado y Desinfectado

Antes de la aplicación de los recubrimientos comestibles, las fresas fueron lavadas con agua limpia para eliminar restos de tierra, y luego se sumergieron en una solución de cloro comercial (hipoclorito de sodio) de 50 ppm de cloro libre residual, durante 5 minutos; según lo recomendado por la UCDAVIS (1997) para controlar la mayoría de patógenos post cosecha suspendidos en el agua.

e. Ecurrado

Las fresas se escurrieron sobre rejillas a temperatura ambiente por 20 minutos, para retirar el exceso de humedad.

f. Recubrimiento de los Frutos

Las fresas se sumergieron en los respectivos recubrimientos durante un minuto, a temperatura de 15 °C y se dejaron escurrir sobre charolas para eliminar el exceso de recubrimiento.

g. Secado

Las fresas recubiertas fueron colocadas sobre bandejas limpias y fueron secadas por convección con aire forzado durante 1 hora, a 20 °C; según lo recomendado por Colla *et al.* (2006), Vargas *et al.* (2006) y Restrepo y Aristizábal (2010).

h. Empacado

Las fresas recubiertas (300 g aproximadamente), se colocaron en bandejas PET con perforaciones en la tapa y en la base, para evitar modificaciones adicionales de la atmósfera, a parte de las ya generadas por los recubrimientos; según lo recomendado por Vargas *et al.* (2006) y Restrepo y Aristizábal (2010).

i. Almacenamiento

Los envases fueron almacenados en refrigeración, en una cámara de temperatura controlada a 5 °C y con 90-95 por ciento de humedad relativa, según lo recomendado por Ouattara *et al.* (2002), Almenar (2005), Vargas *et al.* (2006) y Pastor (2010).

3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.5.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

A continuación se describen las etapas de la presente investigación:

a. Caracterización de la materia prima

En esta etapa se realizó el análisis proximal, de acidez, sólidos solubles, pH e índice de madurez. Los análisis se realizaron por triplicado.

b. Formulación del recubrimiento

Para determinar la composición de las formulaciones y aplicar un diseño de mezclas, se determinaron las restricciones mínimas y máximas sobre la goma de tara, cera abeja y glicerol.

Respecto al uso de goma de tara, la dosis máxima a usar en alimentos está condicionada por las buenas prácticas de fabricación (Codex Alimentarius, 1995). En la práctica se consideró como límite de uso un 0,6%, debido a que en pruebas preliminares se observó que concentraciones superiores a 0,6% originaron soluciones demasiado viscosas que imposibilitaron la disolución del resto de ingredientes.

Con respecto a la cera de abeja se utilizó un rango entre 0 y 0,5 por ciento (w/w), para estudiar el efecto del componente lipídico sobre la composición del recubrimiento. Se observó en pruebas preliminares que valores por encima de 0,5 por ciento resultan en recubrimientos muy opacos.

Para el caso de los límites de glicerol, estos se basaron en estudios previos citados por Cerqueira *et al.* (2009), los cuales demostraron que un máximo de 2 por ciento

de glicerol es necesario; mientras que valores por debajo de 0,5 por ciento dan como resultado recubrimientos muy frágiles.

Se utilizó *Tween* 80® en una proporción constante (0,1 %) en todas las formulaciones para reducir la tensión superficial del recubrimiento y mejorar su humectabilidad sobre la piel del fruto, tal y como lo realizaron Ribeiro *et al.* (2007) y Vargas *et al.* (2006).

En las formulaciones, los tres componentes representaron el 2 % de la “masa total del recubrimiento”. Este 2% es la parte de la mezcla que varió, mientras el 98% se mantuvo constante. A este 2% se le denominó “masa principal del recubrimiento”, ya que estuvo conformado sólo por los 3 ingredientes principales.

Tabla 9: Restricciones sobre los ingredientes principales.

Ingredientes Principales	Límites de las restricciones expresadas como %	Límites de las restricciones expresados como proporciones
Goma de tara	$0,1 \% \leq X_1 \leq 0,6 \%$	$0,05 \leq x_1 \leq 0,3$
Cera de abeja	$0,0 \% \leq X_2 \leq 0,5 \%$	$0,0 \leq x_2 \leq 0,25$
Glicerol	$0,9 \% \leq X_3 \leq 1,9 \%$	$0,45 \leq x_3 \leq 0,95$

La proporción de cada componente estuvo definida como $x_i = X_i/2$ %. Las restricciones expresadas como porcentajes y como proporciones se muestran en la tabla 9.

Considerando el porcentaje de la masa principal y las restricciones determinadas en la Tabla 9, se utilizó el *software* estadístico *Design Expert*® versión 7.0. De esta manera el diseño experimental o grupo de mezclas que se consideró en la investigación fueron dieciséis (11 mezclas y 5 repeticiones). Las mezclas repetidas (F9, F10, F11, F12 y F15) sirvieron para una mejor estimación de la varianza del error experimental (Cornell, 2002).

Los porcentajes de los ingredientes principales respecto de la masa total se detallan en la Tabla 10 y sus proporciones se detallan en la Tabla 11, donde se verifica que sumaron la unidad. Las dieciséis formulaciones de los recubrimientos se presentan en la Tabla 12.

c. Almacenamiento

Cada formulación elaborada se aplicó sobre las fresas y éstas se almacenaron por 9 días para evaluar el efecto de cada formulación sobre las variables respuestas: color, firmeza, pérdida de peso y tasa respiratoria, hacia el final del tiempo de almacenaje.

La pérdida de peso durante el almacenamiento de la fruta se monitoreó mediante los cambios en peso de 20 fresas para cada tratamiento y las mediciones se realizaron por triplicado. Se determinó el porcentaje de pérdida de peso total al final del tiempo de almacenamiento.

La firmeza se midió en la zona ecuatorial de las fresas. Los valores de firmeza fueron de un promedio de 20 fresas por tratamiento y las mediciones se realizaron por triplicado.

Las mediciones de luminosidad se realizaron con un colorímetro Minolta, previamente calibrado, con una ventana de medición de 10 mm, utilizando como sistema de referencia el iluminante D65/observador 10°. Las mediciones se realizaron en 10 fresas sobre su zona ecuatorial y por triplicado para cada formulación.

Para la tasa respiratoria, las muestras de peso conocido (aproximadamente 500 g) se introdujeron en recipientes herméticos de vidrio de volumen conocido (en litros), con un septum en la tapa. Los recipientes de vidrio se almacenaron en una cámara de refrigeración a 5°C. La medida de la concentración de gases se efectuó cada hora por medio de una aguja conectada al analizador de gases, la cual se introdujo a través del septum. Se realizaron 3 repeticiones por cada formulación.

Tabla 10: Porcentaje de los ingredientes principales en las 16 formulaciones.

Formulación	X₁ Goma de tara (%)	X₂ Cera de Abeja (%)	X₃ Glicerol (%)
F1	0,30	0,26	1,44
F2	0,10	0,22	1,68
F3	0,11	0,50	1,39
F4	0,10	0,00	1,90
F5	0,22	0,05	1,74
F6	0,60	0,50	0,90
F7	0,45	0,15	1,39
F8	0,50	0,33	1,17
F9	0,11	0,50	1,39
F10	0,10	0,00	1,90
F11	0,10	0,22	1,68
F12	0,60	0,06	1,34
F13	0,60	0,06	1,34
F14	0,38	0,00	1,62
F15	0,60	0,50	0,90
F16	0,30	0,50	1,20

Tabla 11: Proporciones de los ingredientes principales en las 16 formulaciones.

Formulación	x_1 Goma de tara	x_2 Cera Carnauba	x_3 Glicerol	$x_1+x_2+x_3 = 1$
F1	0,15	0,13	0,72	1,00
F2	0,05	0,11	0,84	1,00
F3	0,06	0,25	0,69	1,00
F4	0,05	0,00	0,95	1,00
F5	0,11	0,02	0,87	1,00
F6	0,30	0,25	0,45	1,00
F7	0,23	0,08	0,70	1,00
F8	0,25	0,16	0,59	1,00
F9	0,06	0,25	0,69	1,00
F10	0,05	0,00	0,95	1,00
F11	0,05	0,11	0,84	1,00
F12	0,30	0,03	0,67	1,00
F13	0,30	0,03	0,67	1,00
F14	0,19	0,00	0,81	1,00
F15	0,30	0,25	0,45	1,00
F16	0,15	0,25	0,60	1,00

Si bien Fonseca *et al.* (2002), mencionan que en este método es difícil estimar con precisión el volumen del espacio de cabeza, éste se halló de la siguiente manera: al término de las mediciones de las concentraciones de gases, las fresas se introdujeron en una probeta graduada de 1 litro y se introdujo agua hasta completar el litro (para ello se fue midiendo con otra probeta la cantidad de agua que se iba añadiendo). Al final el volumen que ocuparon las fresas se determinó por diferencia de un litro menos el volumen del agua. Del mismo modo, el volumen del espacio de cabeza del recipiente de vidrio, se determinó por diferencia entre el volumen del recipiente y el volumen de las fresas. Todos los volúmenes se expresaron en litros.

El analizador de gases permitió medir el contenido de CO₂ en porcentaje, la presión del espacio de cabeza en milímetros de mercurio y su temperatura (°C). Se determinó el volumen en litros que el CO₂ ocupaba en el espacio de cabeza, multiplicando el porcentaje por el volumen del espacio de cabeza. Con estos datos, se utilizó la ecuación universal de los gases ($P \cdot V = n \cdot R \cdot T$), de modo que despejó el número de moles (n) del CO₂, que es equivalente a masa de la sustancia/peso atómico. Conocido el número de moles y el peso atómico del CO₂, se logró despejar la masa de la sustancia (CO₂); expresada en miligramos.

Una vez que las concentraciones del gas se expresaron en mg de CO₂, estas se graficaron frente al tiempo y se consideraron los puntos experimentales en el intervalo de tiempo donde se observó una relación lineal entre la concentración de gases y el tiempo, para asegurar que no se produjeron cambios en la pauta respiratoria de las muestras y que los cambios en la composición del espacio de cabeza no produjeron alteraciones importantes en su metabolismo (Castelló *et al.*, 2006; citados por Pastor, 2010). Luego se determinó la pendiente de esta línea recta y ésta se reemplazó en la Ecuación 18 citada por Fonseca *et al.* (2002).

$$\boxed{TR_{CO_2} = \frac{(Y_{t_f}^{CO_2} - Y_{t_i}^{CO_2}) \times V}{100 \times (t_f - t_i) \times M}} \quad (18)$$

Donde:

Y_t^i es la concentración de gases (porcentaje de CO₂) a tiempo t (h).

V el volumen del espacio de cabeza del recipiente de vidrio (litros).

M es la masa de muestras de fresas introducidas en el recipiente de vidrio (kg).

$(Y/100) \times V =$ Volumen de CO₂ en litros

$$\frac{(Y_{t_f}^{CO_2} - Y_{t_i}^{CO_2}) \times V}{100 \times (t_f - t_i)} \quad \text{Es la pendiente de la recta}$$

La tasa respiratoria de un producto fresco puede expresarse ya sea como velocidad de consumo de O₂ y/o velocidad de producción de CO₂. En cualquiera de los casos, sus unidades se suelen expresar como mg·kg⁻¹·h⁻¹. En este estudio se expresó en términos de mg de CO₂ a manera de poder comparar los resultados con otros autores que lo expresaron en las mismas unidades, tal como Vargas *et al.* (2006), Trejo *et al.* (2007), Hernández *et al.* (2008) y Restrepo y Aristizábal (2010).

d. Optimización simultánea de respuestas

La optimización simultánea de respuestas se realizó teniendo en cuenta la metodología de la “deseabilidad global”, descrita por Derringer y Suich (1980).

El objetivo de esta optimización fue encontrar aquella mezcla que cumpla de la mejor forma con las siguientes restricciones, en base a los resultados observados al final del almacenamiento:

- Luminosidad: maximizar este parámetro.
- Firmeza: maximizar este parámetro.
- Pérdida de peso: minimizar este parámetro.
- Tasa respiratoria: minimizar este parámetro.

Dichas restricciones fueron graficadas en forma de contornos sobre el espacio factorial de la mezcla (gráfico bidimensional). La intersección de dichos contornos definió la denominada “zona de formulación factible”; la misma que fue constituida por todas aquellas mezclas que cumplieron simultáneamente con todas las restricciones impuestas y sobre las cuales se realizó la optimización. De esta manera las funciones de deseabilidad utilizadas fueron:

$$\text{Minimización de la pérdida de peso } d_1 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_1 > Y_1^* \\ \left[\frac{\hat{Y}_1 - Y_1^*}{Y_1^* - Y_1^*} \right]^r & \text{si } Y_1^* \leq \hat{Y}_1 \leq Y_1^* \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_1 < Y_1^* \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{Maximización de la firmeza } d_2 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_2 \leq Y_2^* \\ \left[\frac{\hat{Y}_2 - Y_2^*}{Y_2^* - Y_2^*} \right]^r & \text{si } Y_2^* \leq \hat{Y}_2 \leq Y_2^* \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_2 \geq Y_2^* \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{Minimización de la tasa respiratoria } d_3 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_3 > Y_3^* \\ \left[\frac{\hat{Y}_3 - Y_3^*}{Y_3^* - Y_3^*} \right]^r & \text{si } Y_3^* \leq \hat{Y}_3 \leq Y_3^* \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_3 < Y_3^* \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{Maximización de la luminosidad} \quad d_4 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_4 \leq Y_{4*} \\ \left[\frac{\hat{Y}_4 - Y_{4*}}{Y_{4*} - Y_{4*}} \right]^r & \text{si } Y_{4*} \leq \hat{Y}_4 \leq Y_{4*} \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_4 \geq Y_{4*} \end{cases} \quad (22)$$

Donde:

d_1 : Función de deseabilidad para la pérdida de peso de las fresas recubiertas.

d_2 : Función de deseabilidad para la medida de firmeza.

d_3 : Función de deseabilidad para la tasa respiratoria.

d_4 : Función de deseabilidad para la medida de luminosidad.

\hat{Y}_1 : Pérdida de peso estimada de la fresa recubierta (%).

\hat{Y}_2 : Medida de firmeza estimada de la fresa recubierta (gf).

\hat{Y}_3 : Medida de la tasa de respiración estimada de la fresa recubierta ($\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).

\hat{Y}_4 : Medida de la luminosidad estimada de la fresa recubierta (L^*).

Y_{1*} : Mínima pérdida de peso de la fruta recubierta observada.

Y_1^* : Máxima pérdida de peso de la fruta recubierta observada.

Y_{2*} : Mínima medida de firmeza de la fruta recubierta observada.

Y_2^* : Máxima medida de firmeza de la fruta recubierta observada.

Y_{3*} : Mínima medida de la tasa respiratoria de la fruta recubierta observada.

Y_3^* : Máxima medida de la tasa respiratoria de la fruta recubierta observada.

Y_{4*} : Mínima medida de luminosidad de la fruta recubierta observada.

Y_4^* : Máxima medida de luminosidad de la fruta recubierta observada.

El valor denominado Deseabilidad Global (D) representó la media geométrica de los valores de las deseabilidades individuales, es decir:

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4)^{1/4} \quad (23)$$

La mezcla o formulación del recubrimiento seleccionada como óptima fue aquella que tuvo el mayor valor de D, o aquella que tal y como señala Cornell (2002) si bien tuviese un menor valor de D, represente una buena alternativa al considerar factores adicionales. El recubrimiento obtenido con esta formulación fue denominado “recubrimiento óptimo”.

Luego de conocida la formulación óptima y los valores teóricos de las variables respuestas que arrojó el programa, se realizó una prueba experimental para validar dichos datos teóricos. Para ello se preparó el recubrimiento con la fórmula óptima y se recubrió la fresa, y se almacenó en las condiciones ya mencionadas para realizar las mediciones de las variables en estudio y calcular la variabilidad entre los datos teóricos y los experimentales. Se realizaron cuatro repeticiones para validar las variables en estudio.

Luego de validados los datos, se realizó una comparación entre las fresas recubiertas con el recubrimiento óptimo y fresas control (fresas que siguieron el mismo procedimiento descrito en la Figura 10, pero que no tuvieron ningún recubrimiento), midiendo las variables en estudio a los 0, 2, 4, 6, 8 y 9 días de almacenamiento, por triplicado. En dichos intervalos de tiempo también se realizó un conteo de mohos por triplicado en las fresas recubiertas para evaluar la aptitud de su calidad microbiológica.

e. Caracterización del producto final

En esta etapa se realizaron los análisis de humedad, acidez, sólidos solubles y pH de las fresas recubiertas con el recubrimiento óptimo. Los análisis se realizaron por triplicado.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Los resultados del análisis proximal de las materias primas representaron el promedio de tres repeticiones y su desviación estándar.

3.6.2. DETERMINACIÓN DEL POLINOMIO CANÓNICO DE SCHEFFÉ Y EVALUACIÓN DEL EFECTO DE INGREDIENTES SOBRE LA TASA DE RESPIRACIÓN, PÉRDIDA DE PESO, TEXTURA Y LUMINOSIDAD

Los resultados correspondientes a la tasa de respiración, pérdida de peso, textura y luminosidad fueron expresados como el promedio de las observaciones registradas al final del tiempo del almacenamiento.

Con los resultados obtenidos en las formulaciones experimentales, según la característica analizada (tasa de respiración, pérdida de peso, textura y luminosidad), se realizó un análisis de regresión múltiple (métodos de mínimos cuadrados), con la finalidad de obtener el polinomio canónico de Scheffé que describa la dependencia de cada una de dichas características en función de los ingredientes bajo estudio (Cornell, 2002). La determinación de dicho polinomio, así como su respectivo análisis de varianza y prueba de significancia de coeficientes (nivel de significación $\alpha = 0,05$), fueron llevados a cabo mediante la utilización del programa estadístico *Design Expert*® versión 7.0.

En referencia al ANVA, este consistió de acuerdo a Cornell (2002), en establecer la significancia estadística del modelo y coeficientes del mismo, además de una falta de ajuste (lack of fit) no significativa. La significancia estadística del modelo y de los coeficientes se estableció mediante la prueba F de Fisher, debiéndose registrar un valor de probabilidad F (Prob > F) menor a 0,05. Adicionalmente la bondad de ajuste de la ecuación de regresión a las observaciones experimentales fue

establecida mediante el coeficiente de determinación (R^2), y coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}).

Mediante la aplicación del programa estadístico *Design Expert*® versión 7.0, se obtuvieron la superficie de respuesta, el gráfico de contornos y el gráfico denominado “Trazos de Cox”, correspondientes a los modelos de cada ecuación determinada. El objetivo de los dos primeros gráficos fue brindar una visión panorámica de la variación de la variable en cuestión, en función de los ingredientes estudiados; mientras que con el gráfico de Cox se pudo establecer el efecto que cada ingrediente ejerció sobre cada variable en estudio.

3.6.3. OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA DE RESPUESTAS

Luego de obtenidos los modelos matemáticos para cada una de las respuestas estudiadas, se procedió a la optimización simultánea de las mismas. Para ello se utilizó el programa estadístico *Design Expert*® versión 7 de la Corporación *State-Ease*.

Para realizar la validación de los datos del recubrimiento óptimo se procedió a determinar la variabilidad porcentual que existía entre los valores obtenidos experimentalmente y los teóricos del programa.

Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) y el método LSD (mínimas diferencias significativas) de comparaciones múltiples, con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$), para determinar si existían diferencias en las variables respuestas entre los frutos con recubrimiento óptimo y el control durante su almacenamiento. Para ello se utilizó el programa estadístico *Statgraphics Centurion XVI.I*.

3.6.4. CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO FINAL

Los análisis de humedad, acidez, pH y sólido solubles realizados al producto final fueron el resultado de tres repeticiones.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

4.1.1. COMPOSICIÓN PROXIMAL

En la Tabla 13 se presentan los resultados del análisis proximal de la fresa variedad Aromas. Cabe destacar el alto contenido de agua de esta fruta y un contenido moderado de carbohidratos. Según Nunes (2007), dentro de los azúcares presentes en la fresa, la fructuosa es el azúcar mayoritario, seguido de la glucosa y sacarosa. Según INCAP (2007), la fresa contiene 90,95 % de humedad, 0,67 % de proteína, 0,3 % de grasa, 7,68 % de carbohidratos, 2 % de fibra y 0,4 % de cenizas, reportados en base húmeda. Estos valores son cercanos a los obtenidos en el análisis proximal de la fresa del cultivar Aromas. Las pequeñas diferencias observadas en la composición pueden atribuirse a factores de tipo de cultivar, factores meteorológicos, suelo, etc. (Martínez *et al.*, 2008).

Tabla 13: Composición proximal de la fresa cultivar “Aromas”.

Componente	Porcentaje (b.h.)	Porcentaje (b.s.)
Humedad	88,45 ± 0,39	..
Proteína	0,77 ± 0,04	6,61 ± 0,27
Grasa	0,20 ± 0,03	1,70 ± 0,24
Fibra	1,42 ± 0,01	12,27 ± 0,10
Cenizas	0,44 ± 0,015	3,83 ± 0,13
Carbohidratos	8,72	75,5

4.1.2. ACIDEZ

La acidez titulable promedio para la fresa del cultivar Aromas cosechada en su madurez comercial (3/4 del total de la superficie del fruto con coloración roja) fue de $1,07 \pm 0,16$ g de ácido cítrico/ 100 g de muestra. Este valor se encuentra por encima del hallado por Martínez *et al.* (2008) quien halló un valor de acidez entre 0,4 y 0,52 por ciento para fresa cv. Aromas. Sin embargo, el mismo autor; halló valores de acidez de hasta 1,39 % para fresas del cultivar Camarosa. Es de esperar que los cambios en esta variable estén influenciados por el tipo de cultivar, tiempo de cosecha, clima, etc.

4.1.3. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

La fresa presentó un pH promedio de $3,5 \pm 0,025$. Este valor se halla ligeramente debajo del valor de pH de 3,71 para fresas del cultivar Oso Grande (Machado *et al.*, 2008). Asimismo se encuentra por debajo del rango hallado por Almenar (2005) para fresas silvestres, el cual fue de 3,65 a 3,84. Sin embargo, es superior al pH promedio de 3,25 hallado por Restrepo *et al.* (2009) para fresa fresca del cultivar Camarosa.

4.1.4. SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES

Los azúcares son los principales compuestos solubles en las fresas, siendo la fructuosa, glucosa y sacarosa los azúcares que se encuentran en mayor cantidad y los que determinan el valor de los grados Brix (Martínez *et al.*, 2008). El porcentaje de sólidos solubles en la fresa cultivar Aromas fue de $8,3 \pm 0,25$ por ciento. Este valor es ligeramente superior al hallado por Martínez *et al.* (2008) quien evaluó distintas variedades de fresas, dentro de las cuales el cultivar Aromas presentó un contenido de sólidos de 7,78 por ciento. Mitchan *et al.* (1995), citado por Nunes (2007) indica que uno de los índices de calidad de la fresa son los sólidos solubles y que estos deben ser como mínimo 7 por ciento.

4.1.5. ÍNDICE DE MADUREZ

La relación sólidos solubles-acidez de la fresa en estudio fue de 33,2. Dicho valor está por encima del hallado por Martínez *et al.* (2008) para la fresa del cultivar Aromas que presentó una relación de 18,83, debido a que la acidez encontrada en dichos frutos fue mayor. Sin embargo al analizar fresas de otra variedad encontró una relación aún mayor de 38,83, lo cual puede ser deseable para el consumo en fresco donde se prefieren fresas menos ácidas y más dulces.

4.2. DETERMINACIÓN DEL POLINOMIO CANÓNICO DE SCHEFEÉ Y EVALUACIÓN DEL EFECTO DE INGREDIENTES SOBRE LA TASA DE RESPIRACIÓN, PÉRDIDA DE PESO, TEXTURA Y LUMINOSIDAD

4.2.1. PÉRDIDA DE PESO DE LAS FRESAS RECUBIERTAS

a. Establecimiento del modelo matemático y análisis estadístico

Los valores observados y estimados de la pérdida de peso de las fresas luego de nueve días de almacenamiento y correspondientes a cada una de las formulaciones de recubrimiento estudiadas, son presentados en la Tabla 14. Asimismo la representación gráfica de estos valores se presenta en la Figura 11.

Luego de someter los valores observados al análisis de regresión múltiple, se obtuvo la ecuación polinomial de segundo grado:

$$\hat{y} = -39,63x_1 + 192,23x_2 + 22,91x_3 - 116,26x_1x_2 + 57,96x_1x_3 - 276,18x_2x_3 \quad (26)$$

Donde \hat{y} representa la pérdida de peso estimada de las fresas, mientras que x_1 , x_2 y x_3 corresponden a las proporciones de goma de tara, cera de abeja y glicerol, respectivamente.

Tabla 14: Valores observados y estimados de la pérdida de peso de las fresas recubiertas.

Formulación	x_1 Goma de tara	x_2 Cera Carnauba	x_3 Glicerol	Pérdida de peso Observada (%)	Pérdida de peso Estimada (%)
F1	0,15	0,13	0,72	14,89	13,68
F2	0,05	0,11	0,84	14,81	14,68
F3	0,06	0,25	0,69	13,94	14,43
F4	0,05	0,00	0,95	23,0	22,54
F5	0,11	0,02	0,87	17,85	19,60
F6	0,30	0,25	0,45	12,79	14,51
F7	0,23	0,08	0,70	12,55	14,13
F8	0,25	0,16	0,59	12,38	12,24
F9	0,06	0,25	0,69	13,94	14,43
F10	0,05	0,00	0,95	23,0	22,54
F11	0,05	0,11	0,84	14,79	14,68
F12	0,30	0,03	0,67	14,88	14,28
F13	0,30	0,03	0,67	14,68	14,28
F14	0,19	0,00	0,81	20,16	19,95
F15	0,30	0,25	0,45	15,73	14,51
F16	0,15	0,25	0,60	16,55	15,29

Los resultados del ANVA del modelo de la Ecuación 26, se muestran en el Anexo 1. Como se puede apreciar el valor F calculado (21,69) es mayor al valor tabular $F_{(5, 10, \alpha = 0,05)} = 3,33$, lo cual implica que el modelo es significativo al 95 % de confianza. Esto significa que la relación entre la pérdida de peso y las variables estudiadas (goma de tara, cera de abeja y glicerol) se describe adecuadamente por el polinomio cuadrático indicado en la Ecuación 26. Por otro lado la falta de ajuste resultó ser no significativa, ya que el valor F calculado (2,31) resultó ser menor al valor tabular $F_{(5, 5, \alpha = 0,05)} = 5,05$ y además el p-value resultó ser mayor a 0,0001. Una falta de ajuste no significativa es deseable, ya que indica que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos y que sirve para predecir la nueva respuesta (Mohd *et al.*, 2011).

Se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9156, y un coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) fue de 0,8734. El coeficiente R^2 indica que el 91,56 % de la variación de la variable respuesta o dependiente, es explicada por las variables independientes que han sido admitidas en el modelo elegido. Respecto al R^2 ajustado, Rodríguez y Mora (2001) señalan que dicho coeficiente mide lo mismo que el R^2 pero no queda influenciado por el número de variables que introducimos en el modelo.

Con respecto a los términos de la Ecuación 26, estos fueron analizados mediante la prueba de Fisher, con la finalidad de eliminar aquellos que no presentaran significancia estadística (nivel de significación $\alpha = 0,05$). Según Cornell (2002) cuando el valor p es mayor a 0,05 o 0,01 (dependiendo del nivel de significancia escogido), el término del modelo asociado a dicho valor es no significativo. Acorde a ello y a lo que se presenta en el Anexo 1, resultó que tanto los términos lineales x_1 , x_2 y x_3 ; así como la interacción x_2x_3 , resultaron significativos. Sin embargo x_1x_2 y x_1x_3 , a pesar de ser no significativos, no son removidos ya que los tres términos x_1 , x_2 y x_3 implicados en su efecto son significativos; tal y como lo recomienda StatPoint Technologies Inc. (2006).

b. Efecto de los ingredientes sobre la pérdida de peso de las fresas recubiertas

Las Figuras 12 y 13 muestran la superficie de respuesta y el gráfico de contornos, respectivamente. La Figura 12 representa la pérdida de peso estimada (\hat{y}) en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3); acorde a la Ecuación 26. La altura de la superficie representa el valor estimado \hat{y} , el cual es graficado para todas las mezclas cuyas coordenadas están localizadas dentro de los límites de la región restringida que se encuentra dentro del triángulo; dando como resultado una superficie encima de dicha región. Dicha superficie, se asume como continua para todas las posibles mezclas (Cornell, 2002).

En la superficie de la Figura 12, los colores van desde el azul (para los valores de pérdida de peso más bajos), pasando por el celeste, verde y amarillo; hasta llegar al rojo que representa los valores más altos de pérdida de peso. Los puntos rojos representan los valores reales de la respuesta.

Geoméricamente cada curva de contorno en la Figura 13, es una proyección de una sección transversal de la superficie de pérdida de peso, hecha por un plano paralelo al triángulo que corta a través de la superficie a una altura determinada. Algunas de alturas de los planos de intersección de corte que generan las curvas de nivel (contorno) se encuentran dentro de los cuadrados blancos. Asimismo, se observa que la región experimental no ocupa todo el triángulo, sólo una región restringida por cuatro vértices debido a las restricciones impuestas en las proporciones de los componentes (Tabla 9).

En la Figura 14 los valores estimados de pérdida de peso, usando la Ecuación 26, han sido trazados para las mezclas definidas a lo largo de cada una de las tres líneas: goma de tara ($x_1 = A$), cera de abeja ($x_2 = B$) y glicerol ($x_3 = C$). Estos trazos de Cox revelan cómo cambia la pérdida de peso cuando cambia un componente de la mezcla; mientras la proporción de los otros dos componentes permanece constante.

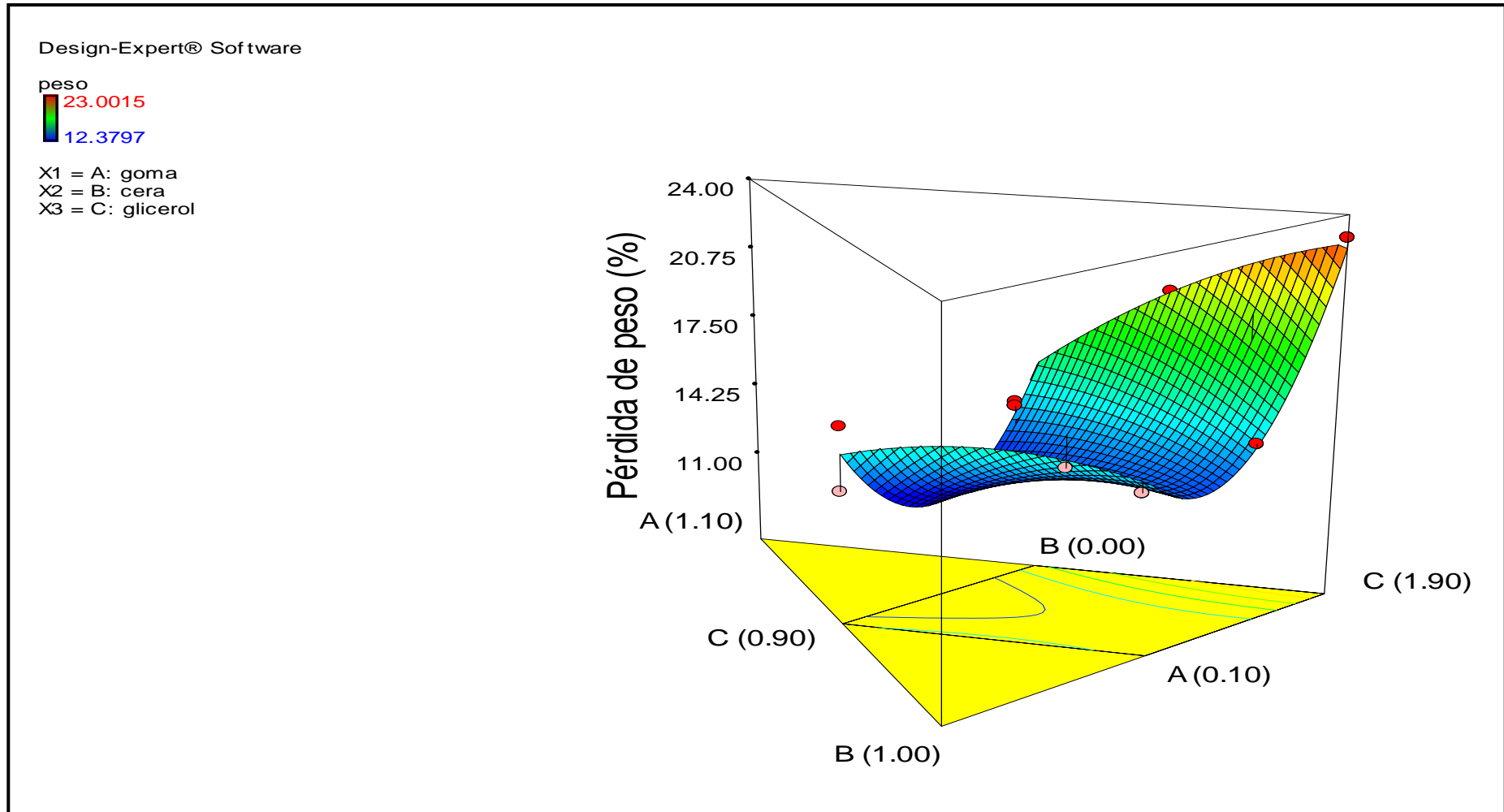


Figura 12: Superficie de respuesta para la pérdida de peso de las fresas recubiertas en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3).

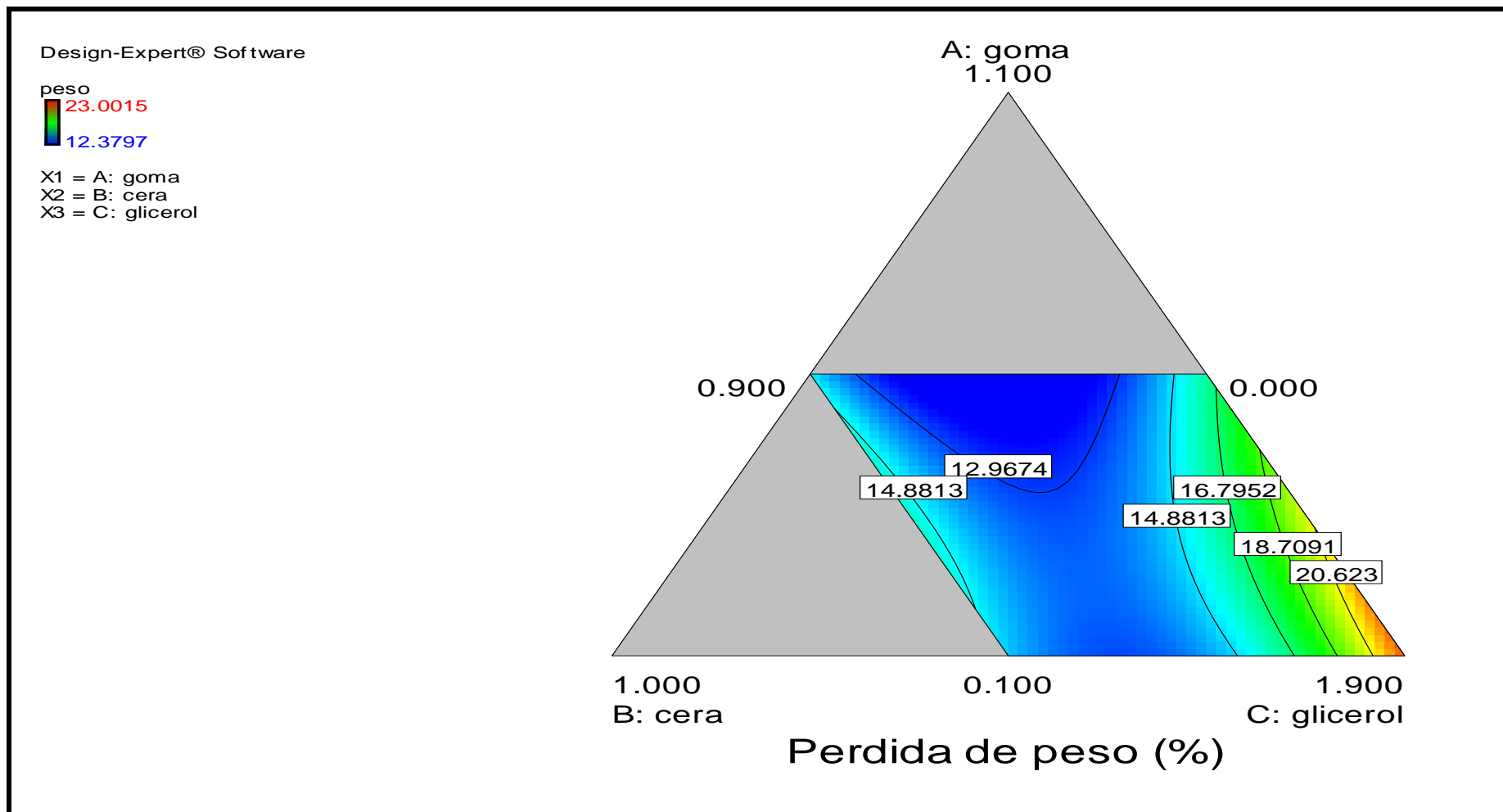


Figura 13: Contornos de la superficie de respuesta para la pérdida de peso de las fresas recubiertas.

Design-Expert® Software

peso

Actual Components

A: goma = 0.350

B: cera = 0.250

C: glicerol = 1.400

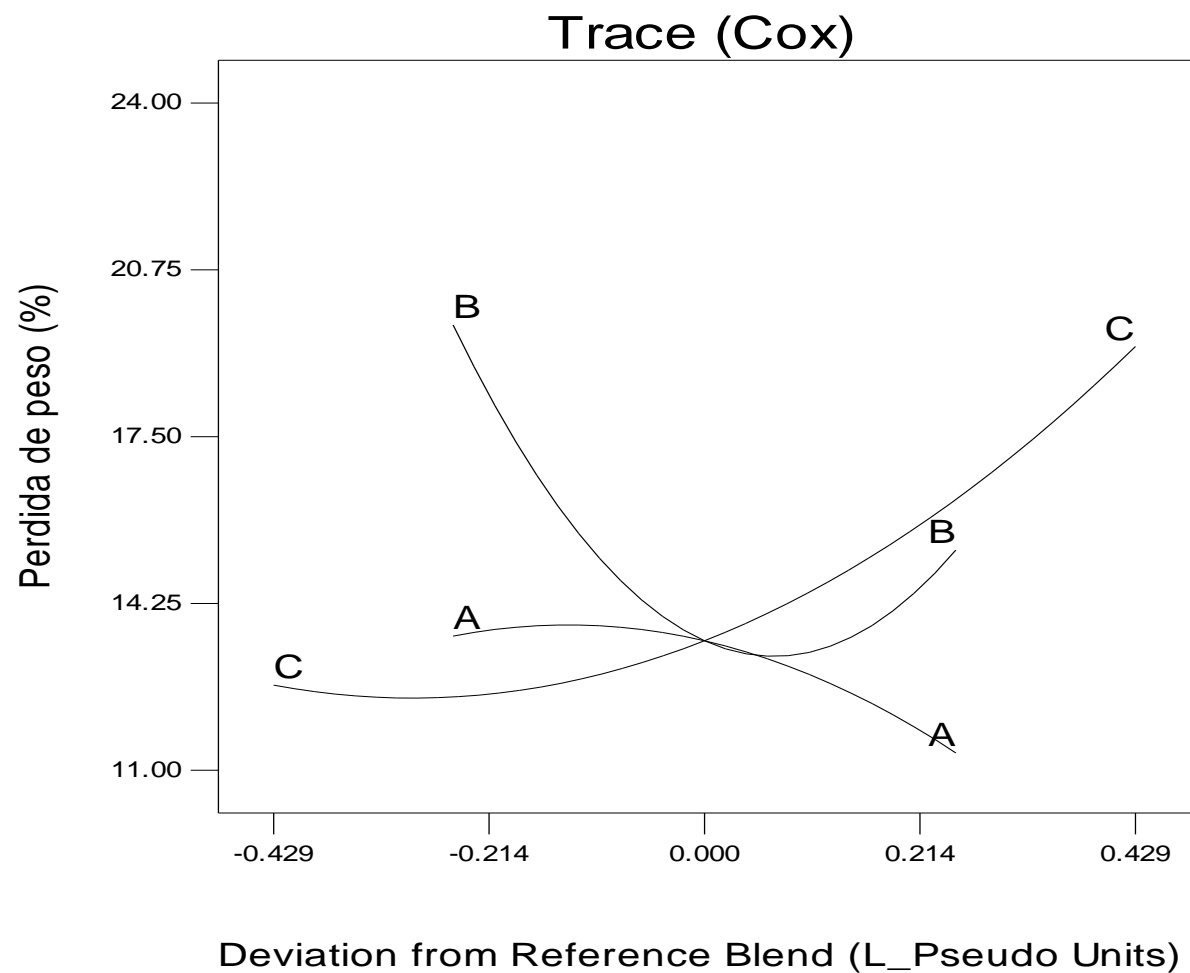


Figura 14: Trazos de Cox para la evaluación del efecto de cada ingrediente sobre la pérdida de peso de las fresas recubiertas.

Los valores a lo largo de la línea de las abscisas de la Figura 14, representan las desviaciones respecto del punto de referencia, medida a lo largo de la línea x_i ($i = 1, 2, 3$) de cada componente. Como se sabe el punto de referencia por defecto es el centroide, que en este caso estuvo formado por las siguientes cantidades: $P_1 = 0,35 \%$, $P_2 = 0,25 \%$ y $P_3 = 1,4 \%$, y que en términos de proporciones se expresa como: $x_1 = 0,175$; $x_2 = 0,125$ y $x_3 = 0,7$; respectivamente.

En la Figura 14 la goma de tara tuvo la mayor influencia positiva sobre la pérdida de peso, ya que una concentración cada vez mayor de ésta (dentro del rango de concentraciones estudiado) origina valores estimados de pérdida de peso cada vez menores, pudiendo llegar a un mínimo estimado de 11 % aproximadamente. Esto podría explicarse en los resultados hallados por Cerqueira *et al.* (2009) quienes encontraron que un incremento en la concentración de galactomananos, para la misma concentración de glicerol, corresponde a una disminución en la permeabilidad al vapor de agua; posiblemente debido a una estructura del gel más firme, donde las moléculas de polisacáridos están más cercanas formando un film con mayor cohesividad. Asimismo, Hernández *et al.* (2008) al usar una mayor concentración de quitosano al 1,5 % encontraron una menor pérdida de peso de 14,2 % al final del tiempo de almacenamiento de 6 días (10 °C y 75 % HR), en comparación a 19,6 % de la concentración de 1 %; cuando la aplicó sobre fresas variedad Camarosa. Esto debido a que la mayor viscosidad de la concentración de 1.5 % de quitosano resultó en un recubrimiento de mayor grosor que redujo la pérdida de humedad.

Las concentraciones de cera de abeja más bajas (cerca de cero); se correspondieron con los valores más altos de pérdida de peso y a medida que la concentración de cera se incrementa hacia 0,3 %, la pérdida de peso disminuye hasta volverse mínima. Esta reducción inicial de la pérdida de peso por efecto del incremento de lípido, se debe a que los lípidos son compuestos hidrófobos y no poliméricos con buenas propiedades barrera al vapor de agua y a los gases (Shellhammer y Krotcha, 1997; citados por Pastor, 2010).

Se observa también que la pérdida de peso volvió a aumentar cuando la concentración de cera se incrementó por encima de 0,3 % de cera. Esto coincide

con Navarro (2007), quien indica que a pesar que existe una reducción de la permeabilidad al aumentar el contenido de lípido, algunos estudios muestran que hay un contenido crítico a partir del cual las propiedades barreras de la película no mejoran e incluso pueden empeorar. Esto se debe a que la barrera al vapor de agua puede verse disminuida debido a diferentes factores como lo son el tamaño de partícula y los fenómenos de cremación o floculación. Según Meza (2006), las propiedades barrera al vapor de agua están determinadas por el grado de distribución y tamaño de partículas hidrófobas dispersas, formando una trayectoria tortuosa para el paso de los gases o vapor de agua. Si la distribución y tamaño del material hidrófobo es uniforme, la tortuosidad del recubrimiento se incrementa y en consecuencia se incrementa la resistencia a la permeación. Por otro lado, cuando la distribución no es homogénea y existe coalescencia, la difusión del gas permeante encuentra poca resistencia, por lo que la permeabilidad aumenta, así como la pérdida de estabilidad estructural del recubrimiento como consecuencia de la hidratación.

Morillón *et al.* (2002) indica que cada sustancia hidrofóbica tiene sus propias propiedades físico químicas y por lo tanto los films comestibles basados en lípidos tienen un comportamiento variable frente a la transferencia de humedad. La polaridad de los constituyentes lipídicos tiene que ser considerada, esto es, la distribución de los potenciales electrostáticos de las moléculas, lo cual depende del grupo químico, la longitud de la cadena alifática y la presencia de insaturaciones. Greener y Fennema (1993), afirman que las ceras son las sustancias más eficientes para reducir la permeabilidad a la humedad causada por su alta hidrofobicidad, la cual se debe a su alto contenido en largas cadenas de alcoholes grasos y alcanos con largas cadenas.

En lo que se refiere al efecto del glicerol, los valores estimados de pérdida de peso aumentan a medida que la concentración de glicerol se incrementa dentro del rango estudiado. Esto podría explicarse debido a que el glicerol causa un aumento en la permeabilidad al vapor de agua del recubrimiento y esto puede ser atribuido a las propiedades hidrófilas de este componente las cuales favorecen la absorción de moléculas de agua. Además su acción plastificante, modifica la estructura del polímero volviéndola menos densa debido a un incremento en la movilidad de las

cadena polimérica y en el volumen libre del recubrimiento (Diab *et al.*, 1993; citado por Cerqueira *et al.*, 2009). Asimismo, Yang y Paulson (2000), citados por Bourtoom (2008b) indican que un incremento en el espacio intercatenario, debido a la inclusión de moléculas de glicerol entre las cadenas poliméricas, promueve la difusividad de vapor de agua a través del film y por lo tanto acelera la transmisión del vapor de agua.

El incremento en la permeabilidad al vapor de agua de recubrimientos comestibles, debido al incremento en la concentración de plastificantes; ha sido también reportada en recubrimientos de galactomananos sobre frutas tropicales, donde se halló que mayores concentraciones de glicerol incrementaron la permeabilidad al vapor de agua (Cerqueira *et al.*, 2009). Del mismo modo, Bourtoom (2008b) halló que los recubrimientos de almidón de arroz y quitosano plastificados con glicerol produjeron un mayor aumento en la permeabilidad al vapor de agua, que los recubrimientos plastificados con sorbitol y polietilenglicol en todas las concentraciones estudiadas.

4.2.2. FIRMEZA DE LAS FRESAS RECUBIERTAS

a. Establecimiento del modelo matemático y análisis estadístico

Los valores observados y estimados de la firmeza de las fresas recubiertas al final del tiempo de almacenamiento, son presentados en la Tabla 15 y su representación gráfica en la Figura 15. Luego de someter los valores observados al análisis de regresión múltiple, se obtuvo la siguiente ecuación polinomial de segundo grado:

$$\hat{y} = 1061,57x_1 - 1717,53x_2 + 386,58x_3 + 1792,54x_1x_2 - 665,71x_1x_3 + 3350x_2x_3 \quad (27)$$

Donde \hat{y} representa la firmeza estimada o predicha de las fresas, mientras que x_1 , x_2 y x_3 corresponden a las proporciones de goma de tara, cera de abeja y glicerol, respectivamente.

Tabla 15: Valores observados y estimados de la firmeza de las fresas recubiertas.

Formulación	x_1 Goma de tara	x_2 Cera Carnauba	x_3 Glicerol	Firmeza Observada (gf)	Firmeza Estimada (gf)
F1	0,15	0,13	0,72	487,40	490,91
F2	0,05	0,11	0,84	475,92	480,32
F3	0,06	0,25	0,69	479,73	478,94
F4	0,05	0,00	0,95	365,98	388,71
F5	0,11	0,02	0,87	474,56	424,24
F6	0,30	0,25	0,45	485,40	484,50
F7	0,23	0,08	0,70	475,88	479,48
F8	0,25	0,16	0,59	505,55	508,09
F9	0,06	0,25	0,69	480,42	478,94
F10	0,05	0,00	0,95	395,98	388,71
F11	0,05	0,11	0,84	474,00	480,32
F12	0,30	0,03	0,67	499,36	475,61
F13	0,30	0,03	0,67	460,58	475,61
F14	0,19	0,00	0,81	383,69	412,37
F15	0,30	0,25	0,45	484,17	484,50
F16	0,15	0,25	0,60	472,50	471,61

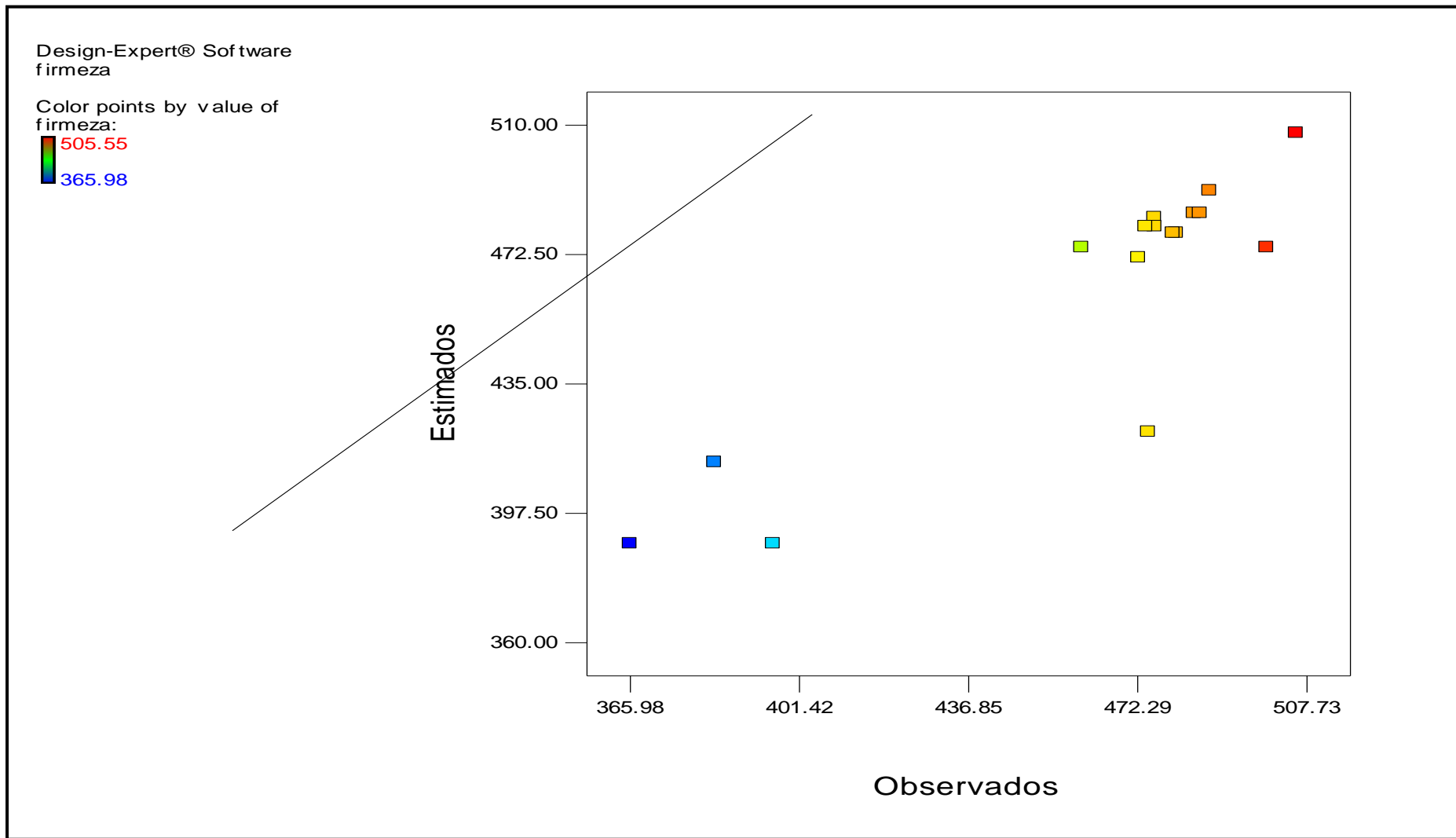


Figura 15: Valores observados y estimados de la firmeza de las fresas recubiertas con las formulaciones experimentales.

Los resultados del ANVA de la Ecuación 27, se muestran en el Anexo 2. El valor F calculado (8,06) fue mayor al valor tabular $F(5, 10, \alpha = 0,05) = 3,33$, lo cual implica que el modelo es significativo al 95 % de confianza. Esto significa que la relación entre la firmeza y las variables estudiadas (goma de tara, cera de abeja y glicerol) se describe bien por el polinomio cuadrático indicado en la Ecuación 27. Asimismo la falta de ajuste resultó ser no significativa, ya que el valor F calculado (3,31) resultó ser menor al valor teórico $F(5, 5, \alpha = 0,05) = 5,05$.

De acuerdo al coeficiente de determinación (R^2), el 80,11 % de la variación en la respuesta es explicado por el modelo seleccionado. Con referencia al coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) cuyo valor fue de 0,7017, se puede establecer que el modelo de la Ecuación 27 se ajusta de manera adecuada a los datos experimentales en la Tabla 16; ya que este valor sigue siendo aceptable.

Respecto a la significancia de los coeficientes del modelo de la Ecuación 27, analizados por medio de la prueba de Fisher, se puede afirmar (según el Anexo II) que los términos lineales x_1 , x_2 y x_3 ; así como la interacción x_2x_3 , resultaron significativos. Sin embargo x_1x_2 y x_1x_3 , a pesar de ser no significativo, no es removido ya que los términos x_1 , x_2 y x_3 implicados en su efecto son significativos; tal y como lo recomienda StatPoint Technologies Inc. (2006).

b. Efecto de los ingredientes sobre la firmeza de las fresas recubiertas

Las Figuras 16 y 17 muestran la superficie de respuesta y el gráfico de contornos, respectivamente; para la firmeza de las fresas frescas refrigeradas, en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3). Como ya se explicó, la altura de la superficie de la Figura 16 está formada por todos los valores estimados de la firmeza; los cuales se van graficando en forma perpendicular al área experimental dentro del triángulo de mezclas. En dicha superficie, los valores más altos de firmeza se representan por el color rojo y los más bajos por el color azul.

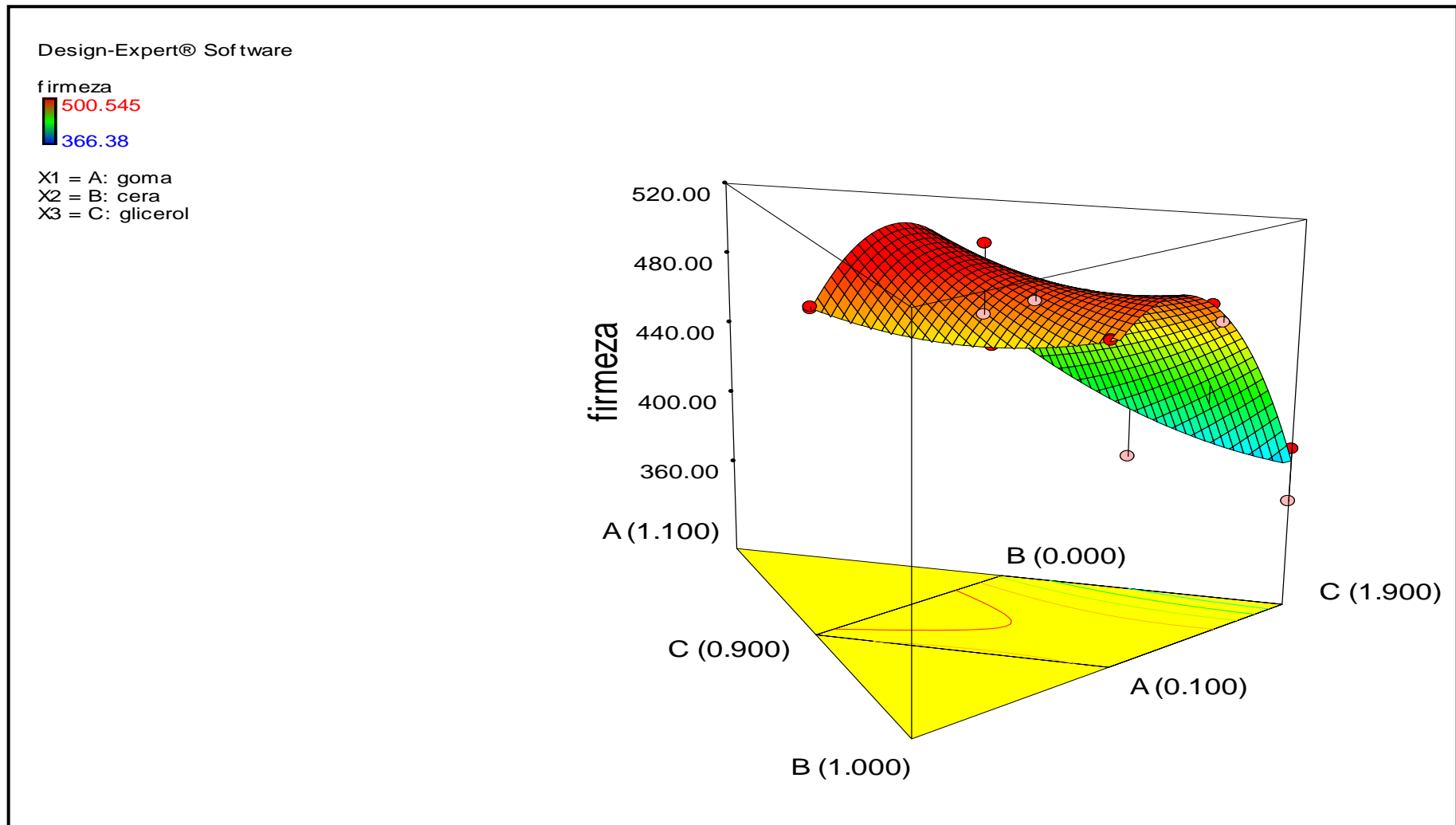


Figura 16: Superficie de respuesta para la firmeza de las fresas recubiertas en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3).

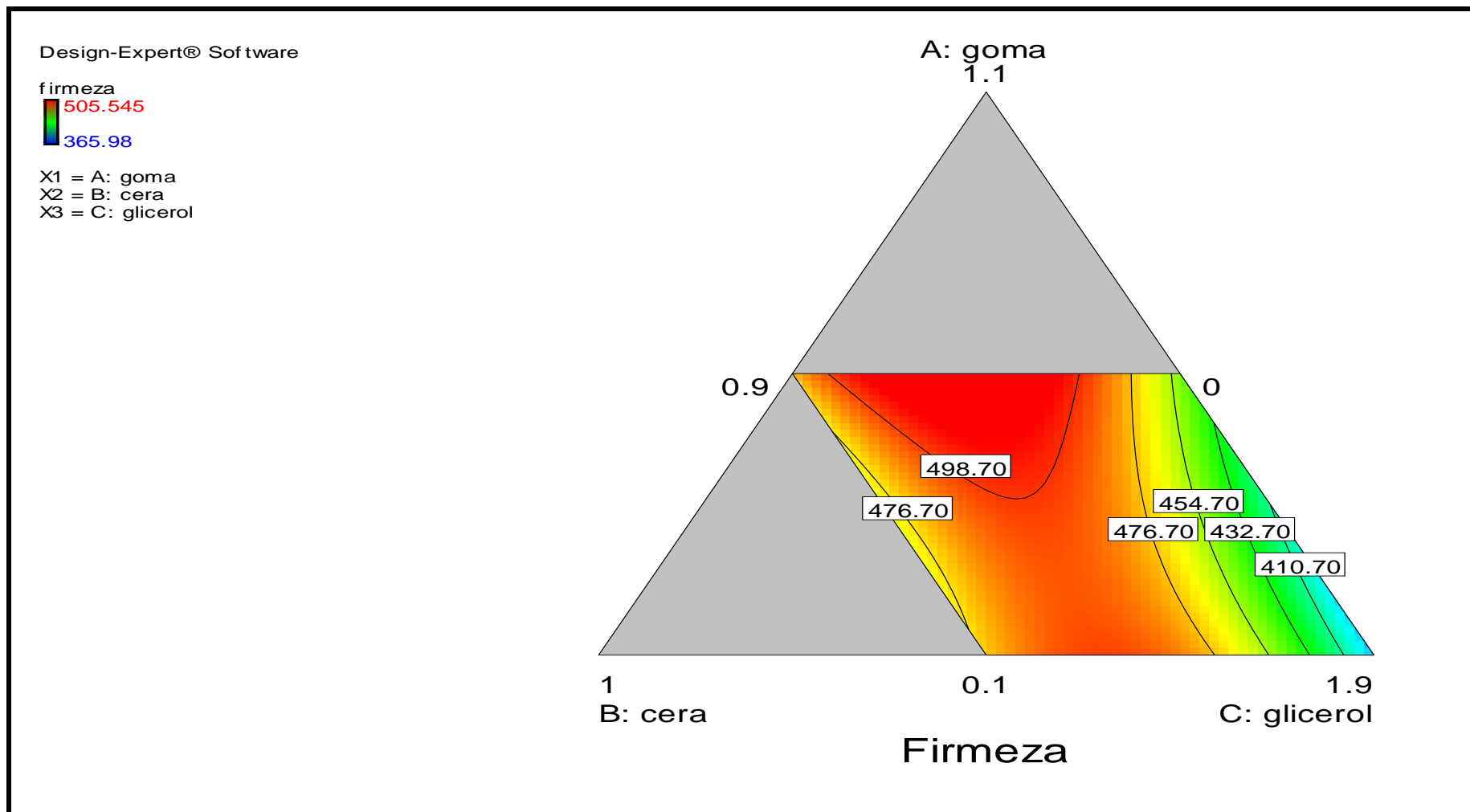


Figura 17: Contornos de la superficie de respuesta para la firmeza de las fresas recubiertas.

En la Figura 18 se puede apreciar que el componente goma de tara tuvo la mayor influencia positiva sobre la firmeza, ya que a medida que su concentración se incrementó dentro del rango estudiado; la firmeza también aumentó. Al respecto, Del Valle *et al.* (2005), citado por Aguilar (2005); señala que a pesar del carácter hidrofílico de muchos biopolímeros, ellos pueden actuar como una barrera a la transferencia de agua, retardando la deshidratación y, prolongando por lo tanto, la firmeza de los frutos.

En el presente trabajo se puede corroborar, comparando los Tablas 15 y 16, que las menores pérdidas de peso se corresponden con una mayor firmeza. Al respecto, Navarro (2007) menciona varios estudios realizados en cítricos, donde se ha observado una correlación entre la firmeza del fruto y la pérdida de peso del mismo; siendo la deshidratación la responsable de la pérdida de turgencia del fruto y, por lo tanto, responsable de la pérdida de firmeza.

Asimismo, comparando las Figuras 14 y 18, se puede corroborar que los efectos de la concentración de cada componente tanto sobre la pérdida de peso como sobre la firmeza, fueron congruentes: el incremento de la goma de tara que produjo disminución en la pérdida de peso, produjo un aumento en la firmeza. Asimismo el efecto de la cera, que produjo un aumento de la pérdida de peso hacia ambos lados del punto de referencia; produjo el efecto contrario en la firmeza; es decir que la firmeza disminuyó hacia ambos lados del punto de referencia. Por último, el incremento de glicerol que produjo un aumento de la pérdida de peso; produjo la disminución de la firmeza; lo cual es congruente con lo explicado en el párrafo anterior.

En estudios realizados con otro tipo de recubrimiento se ha encontrado que un incremento en la concentración del hidrocoloide incrementa la firmeza de la fruta, tal y como lo indica Hernández *et al.* (2008) quienes trabajaron con recubrimientos de quitosano sobre fresas; donde evidenciaron diferencias significativas al final del tiempo de almacenamiento (6 días a 10 °C y 75 % HR) entre el control y la fruta

Design-Expert® Software

firmeza

Actual Components

A: goma = 0.350

B: cera = 0.250

C: glicerol = 1.400

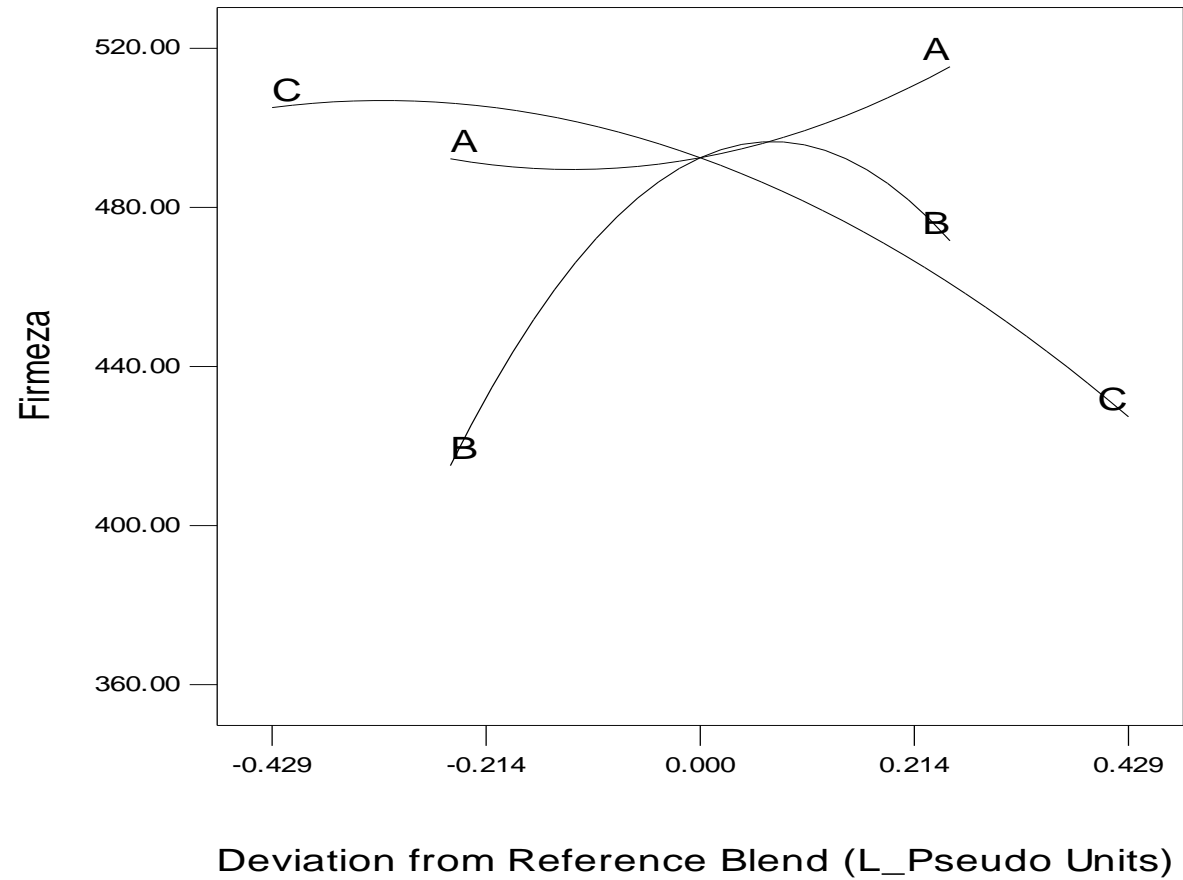


Figura 18: Trazos de Cox para la evaluación del efecto de cada ingrediente sobre la firmeza de las fresas recubiertas.

tratada y entre las concentraciones de quitosano, presentando la concentración de 1,5 % una mayor firmeza que la concentración de 1 %.

Respecto a la influencia de la cera de abeja, se observa que concentraciones muy bajas de cera no son beneficiosas para la firmeza ya que hacen que esta sea mínima (valores estimados cercanos a 420 gf), sin embargo a medida que la concentración se incrementa hacia 0,3 %; los valores estimados de firmeza se ven incrementados hasta alcanzar un máximo; para finalmente volver a disminuir con concentraciones mayores a 0,3 %. Algo similar se halló en un estudio realizado en ciruelas, donde se encontró que los recubrimientos con cera de abeja al 0 y 20 por ciento fueron más efectivos manteniendo la firmeza de las ciruelas, que los de mayor contenido de cera (Navarro, 2007).

Shellhammer y Krochta (1997), citados por Navarro (2007); indican que las moléculas del lípido dispersas en la matriz hidrocoloide, interrumpen la continuidad de la misma; modificando sus propiedades mecánicas y producto de estas discontinuidades, se forman puntos de fractura que reducen la resistencia de la película a la tracción. Por ello que, un aumento del mismo empeora las propiedades mecánicas de las películas y su exceso da lugar a películas muy frágiles.

Por otro lado también se puede afirmar que el hecho de haber adicionado un emulsificante (*Tween* 80), pudo haber disminuido el efecto negativo del lípido de formar películas quebradizas; ya que estos favorecen la dispersión del lípido en la matriz hidrocoloide y mejoran la capacidad de recubrimiento para impregnar al alimento y formar una capa continua en la superficie del mismo (Kester y Fennema, 1986).

En cuanto al glicerol, se observa que tiene una influencia negativa muy significativa sobre la firmeza ya que su aumento dentro del rango de concentraciones estudiadas, produjo una pérdida progresiva de la firmeza del fruto. Bourtoom (2008b); encontró en su estudio que, un incremento en la concentración de plastificantes (sorbitol, glicerol y polietilenglicol) produjo una disminución en la tracción de películas de almidón y quitosano. Si bien el aumento en el contenido del plastificante suele tener un efecto positivo en las propiedades mecánicas y de

barrera de vapor de agua y gases, aumentando la flexibilidad, elongación y permeabilidad de la película, Navarro (2007) indica que puede existir un “efecto de anti plastificación” el cual se refiere a un aumento de la fragilidad y de la barrera de vapor de agua de la película por adición de un plastificante. La anti plastificación se atribuye a diversos mecanismos como la reducción de volumen libre entre las cadenas de polímero, la interacción polímero – plastificante y la presencia de moléculas de plastificantes unidas a los grupos polares del polímero.

4.2.3. TASA RESPIRATORIA DE LAS FRESAS RECUBIERTAS

a. Establecimiento del modelo matemático y análisis estadístico

Los valores observados y estimados de la tasa respiratoria de las fresas recubiertas al final del tiempo de almacenamiento se encuentran en la Tabla 16. Asimismo la representación gráfica de estos valores se muestra en la Figura 19.

Luego de someter los valores observados al análisis de regresión múltiple, se obtuvo la siguiente ecuación polinomial de segundo grado:

$$\hat{y} = 64,85x_1 + 61,14x_2 + 51,89x_3 + 34,79x_1x_2 - 50,73x_1x_3 - 53,75x_2x_3 \quad (28)$$

Donde \hat{y} representa la tasa de respiración estimada de las fresas, mientras que x_1 , x_2 y x_3 corresponden a las proporciones de goma de tara, cera de abeja y glicerol, respectivamente.

Los resultados del ANVA de la Ecuación 28, se muestran en el Anexo 3. Como se puede apreciar el valor F calculado (28,17) es mayor al valor tabular $F_{(5, 10, \alpha = 0,05)} = 3,33$, lo cual implica que el modelo es significativo al 95 % de confianza. Esto significa que la relación entre la tasa respiratoria de CO₂ y las variables estudiadas (goma de tara, cera de abeja y glicerol) se describe bien por el polinomio cuadrático indicado en la Ecuación 28.

Tabla 16: Valores observados y estimados de la tasa respiratoria de las fresas recubiertas.

Formulación	x_1 Goma de tara	x_2 Cera Carnauba	x_3 Glicerol	Tasa Respiratoria Observada mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹	Tasa Respiratoria Estimada mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹
F1	0,15	0,13	0,72	45,47	45,21
F2	0,05	0,11	0,84	46,57	46,65
F3	0,06	0,25	0,69	42,89	44,12
F4	0,05	0,00	0,95	50,45	50,13
F5	0,11	0,02	0,87	47,16	47,88
F6	0,30	0,25	0,45	47,70	47,80
F7	0,23	0,08	0,70	45,04	45,09
F8	0,25	0,16	0,59	45,78	45,48
F9	0,06	0,25	0,69	45,12	44,12
F10	0,05	0,00	0,95	50,45	50,13
F11	0,05	0,11	0,84	46,40	46,65
F12	0,30	0,03	0,67	45,21	45,09
F13	0,30	0,03	0,67	45,28	45,09
F14	0,19	0,00	0,81	46,22	46,55
F15	0,30	0,25	0,45	47,51	47,80
F16	0,15	0,25	0,60	44,32	44,82

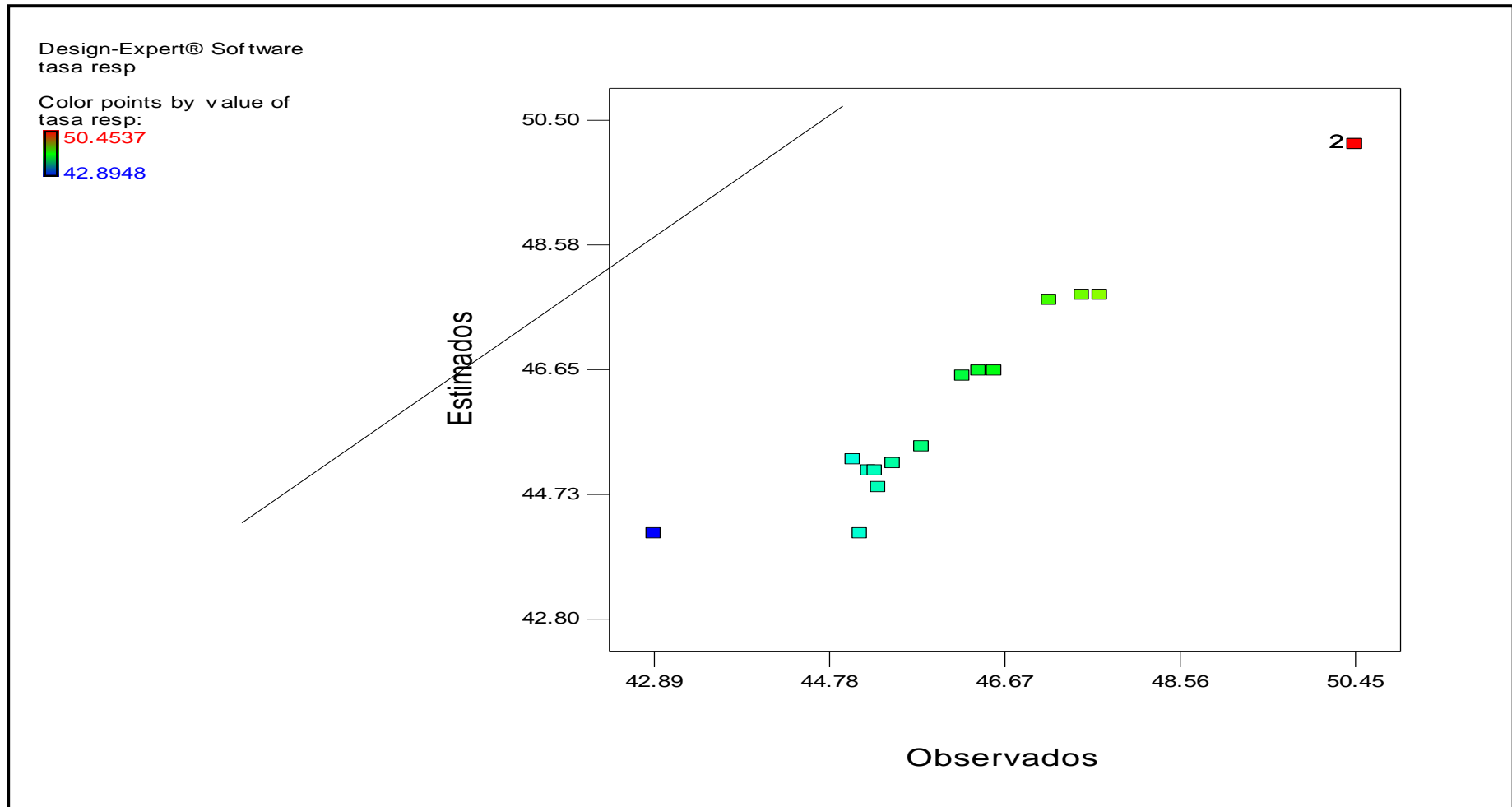


Figura 19: Valores observados y estimados de la tasa respiratoria de las fresas recubiertas con las formulaciones experimentales.

Un *p-value* ($< 0,0001$) menor al nivel de significancia (0,05) indica que el modelo es estadísticamente significativo. Por otro lado la falta de ajuste resultó ser no significativa, lo que indica un ajuste adecuado del modelo con los datos.

De acuerdo al coeficiente de determinación (R^2), el 93,37 % de la variación en la respuesta es explicado por el modelo seleccionado. Con referencia al coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) cuyo valor fue de 90,06 % se puede establecer que el modelo de la Ecuación 28 se ajusta de manera adecuada a los datos experimentales en la Tabla 17.

Respecto a la significancia de los coeficientes del modelo, se puede afirmar (según el Anexo III) que los términos lineales x_1 , x_2 y x_3 ; resultaron significativos, al ser el *p-value* menor al nivel de significancia.

b. Efecto de los ingredientes sobre la tasa respiratoria de las fresas recubiertas

Las Figuras 20 y 21 muestran la superficie de respuesta y el gráfico de contornos, respectivamente; para la tasa respiratoria de las fresas frescas refrigeradas, en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3).

En la Figura 22 se presentan los “Trazos de Cox”.

Respecto a la influencia de la concentración de goma sobre la tasa respiratoria, se puede observar en la Figura 22, que si la concentración se incrementa desde 0 a 0,35 %, la tasa respiratoria tiende a disminuir; haciéndose mínima en la coordenada de referencia (0,35 % para la goma de tara), para finalmente volver a incrementarse ligeramente con concentraciones mayores a 0,35 % y que van hasta 0,6 %. Hernández *et al.* (2008), también encontró que concentraciones de 1,5 % de polímero (quitosano) aplicado a fresas, hicieron disminuir la tasa respiratoria en mayor grado que la concentración de 1 %; debido a una modificación de la atmósfera interna, lo cual sugiere ser la causa de una reducción en la producción de CO_2 en fruta recubierta.

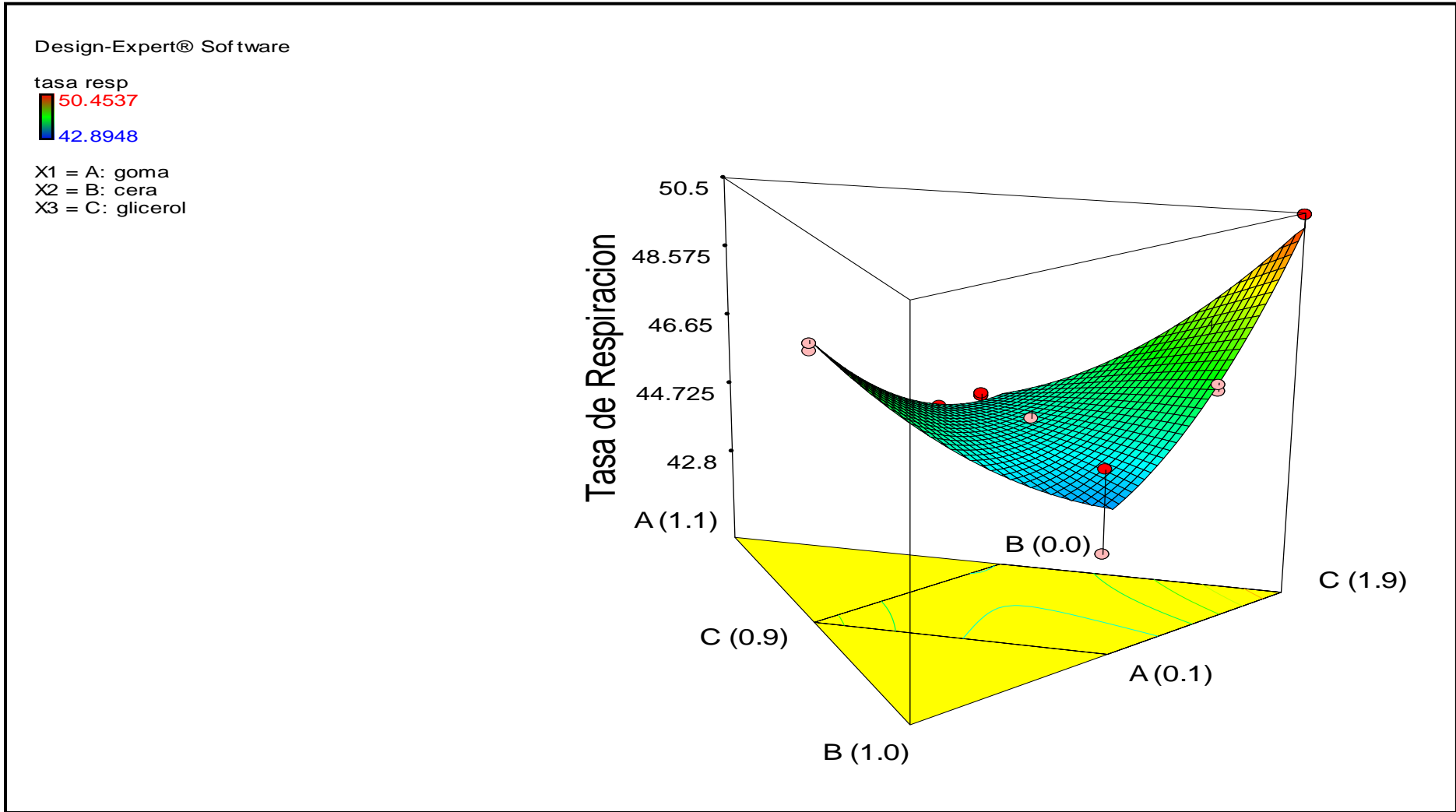


Figura 20: Superficie de respuesta para la tasa respiratoria de las fresas recubiertas en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3).

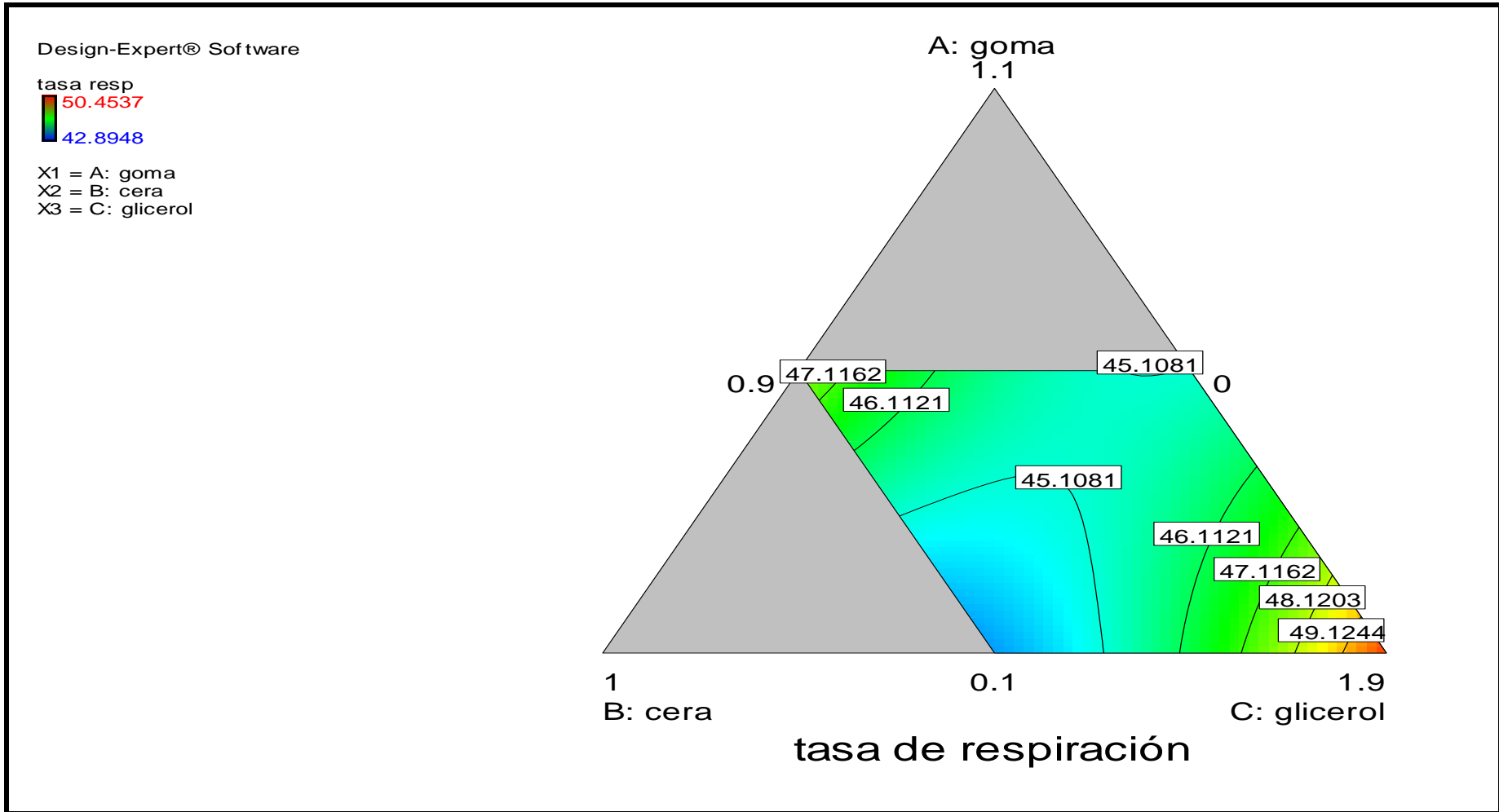


Figura 21: Contornos de la superficie de respuesta para la tasa respiratoria de las fresas recubiertas.

Design-Expert® Software

tasa resp

Actual Components

A: goma = 0.350

B: cera = 0.250

C: glicerol = 1.400

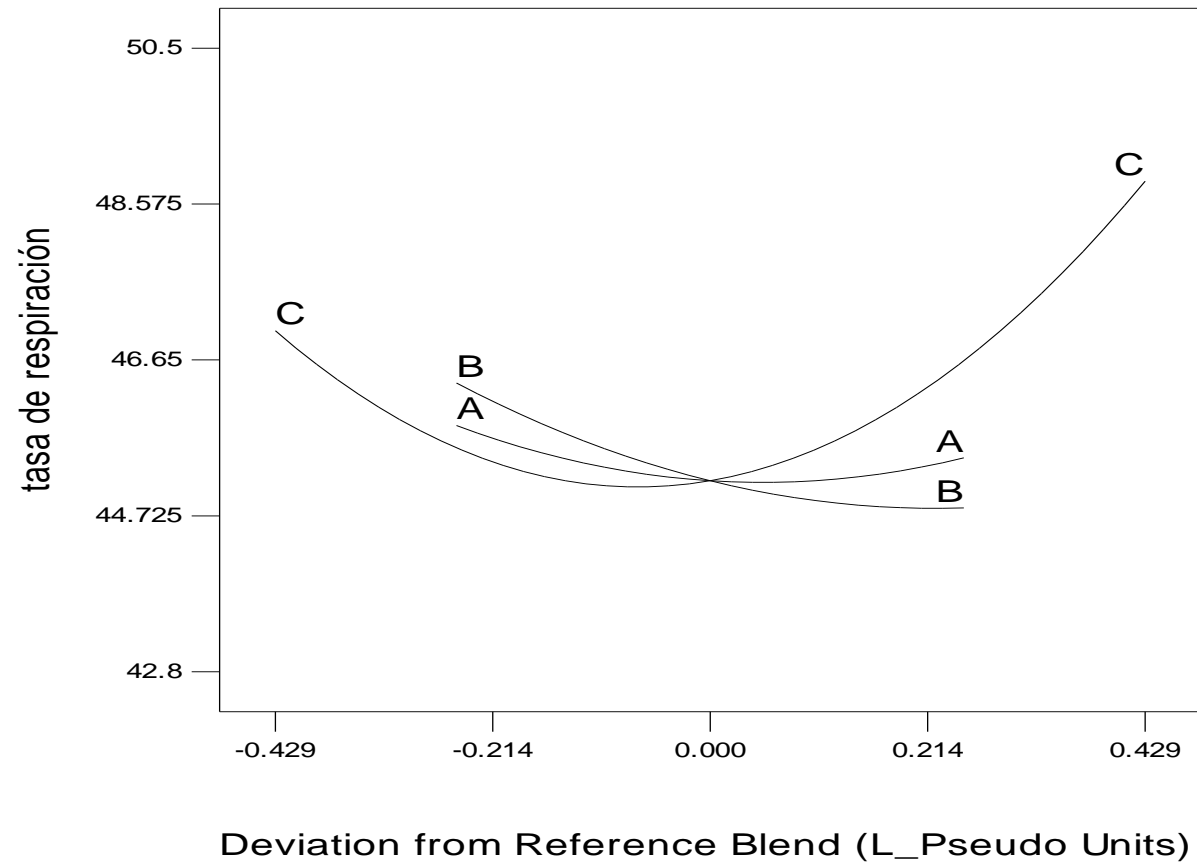


Figura 22: Trazos de Cox para la evaluación del efecto de cada ingrediente sobre la tasa respiratoria de las fresas recubiertas.

En cuanto al contenido de cera de abeja sobre la tasa respiratoria, se observa que tuvo la mayor influencia positiva de los tres ingredientes ya que, conforme el contenido de cera aumenta dentro del rango estudiado; la tasa respiratoria disminuye hasta un mínimo estimado de $44,8 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Esta tendencia también fue observada por Vargas *et al.* (2006) quien encontró que mayores concentraciones de ácido oleico, en un film de quitosano aplicado sobre fresas, disminuía la tasa respiratoria durante casi todo el tiempo de almacenamiento (9 días). Esto debido al conocido efecto de los lípidos sobre las propiedades barreras de gases de films de polisacáridos.

La forma de los cristales de lípido también aumentan su permeabilidad al vapor de agua y gases, siendo así que los cristales ortorrómbicos presentes en cera de abeja y cera parafina proporcionan mejor barrera que los cristales hexagonales presentes por ejemplo en monoglicéridos acetilados, lo que se atribuye a una mejor compactación de los mismos, formando asociaciones densas sin apenas espacio para las moléculas de vapor y gases (Kester y Fennema, 1989; citados por Navarro, 2007).

En el caso del contenido de glicerol, es el componente con el mayor efecto negativo sobre la tasa respiratoria, ya que el máximo valor estimado (aproximadamente $49 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) se correspondió con la concentración más alta de glicerol (1,9 %). En la Figura 22 también se aprecia que la tasa de producción de CO_2 aumenta hacia ambos lados de la coordenada de referencia (1,4 %); haciéndose mínima en dicho punto. El incremento debido a concentraciones por encima de 1,4 % de glicerol, podría ser atribuido al efecto anti plastificante del glicerol, que como ya se explicó anteriormente modifica la estructura del polímero, incrementando los espacios intercatenarios; lo que promueve una mayor difusión de vapor y gases (Yang y Paulson, 2000; citados por Bourtoom, 2008b).

4.2.4. LUMINOSIDAD DE LAS FRESAS RECUBIERTAS

a. Establecimiento del modelo matemático y análisis estadístico

Los valores observados y estimados de la luminosidad de las fresas recubiertas al final del tiempo de almacenamiento son presentados en la Tabla 17. Asimismo la representación gráfica de dichos valores, se presenta en la Figura 23.

Luego de someter los valores observados al análisis de regresión múltiple, se obtuvo la siguiente ecuación polinomial de segundo grado:

$$\hat{y} = -35,78x_1 + 66,36x_2 + 24,35x_3 + 42,69x_1x_2 + 111,84x_1x_3 - 43,54x_2x_3 \quad (29)$$

Donde \hat{y} representa la luminosidad estimada o predicha de las fresas, mientras que x_1 , x_2 y x_3 corresponden a los porcentajes de goma de tara, cera de abeja y glicerol, respectivamente.

Los resultados del ANVA de la Ecuación 29, se muestran en el Anexo 4. Como se observa el valor F calculado (11,98) es mayor al valor tabular $F_{(5, 10, \alpha = 0.05)} = 3,33$, lo cual implica que el modelo es significativo al 95 % de confianza. Esto significa que la relación entre la luminosidad y las variables estudiadas (goma de tara, cera de abeja y glicerol) se describe bien por el polinomio cuadrático de la ecuación 29. Un *p-value* menor al nivel de significancia (0,05) también indica que el modelo es estadísticamente significativo. Por otro lado la falta de ajuste resultó ser no significativa, ya que el valor F calculado (3,31) fue menor al valor tabular $F_{(5, 5, \alpha = 0,05)} = 5,05$; por lo que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos.

De acuerdo al coeficiente de determinación (R^2), el 85,69 % de la variación en la respuesta es explicado por el modelo seleccionado. Con referencia al coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) cuyo valor fue de 78,54 %, se puede establecer que el modelo de la Ecuación 29 se ajusta de manera adecuada a los datos experimentales en la Tabla 18.

Tabla 17: Valores observados y estimados de la luminosidad de las fresas recubiertas.

Formulación	x_1 Goma de tara	x_2 Cera Carnauba	x_3 Glicerol	Luminosidad Observada L*	Luminosidad Estimada L*
F1	0,15	0,13	0,72	29,89	29,63
F2	0,05	0,11	0,84	26,29	26,88
F3	0,06	0,25	0,69	28,96	28,85
F4	0,05	0,00	0,95	27,66	26,66
F5	0,11	0,02	0,87	29,15	28,78
F6	0,30	0,25	0,45	30,37	30,22
F7	0,23	0,08	0,70	29,34	29,79
F8	0,25	0,16	0,59	29,99	30,17
F9	0,06	0,25	0,69	28,74	28,85
F10	0,05	0,00	0,95	25,15	26,66
F11	0,05	0,11	0,84	27,71	26,88
F12	0,30	0,03	0,67	29,67	29,56
F13	0,30	0,03	0,67	29,64	29,56
F14	0,19	0,00	0,81	30,25	30,14
F15	0,30	0,25	0,45	30,27	30,22
F16	0,15	0,25	0,60	30,90	30,97

Respecto a la significancia de los coeficientes del modelo, analizada por medio de la prueba de Fisher, se puede afirmar que los términos lineales x_1 , x_2 y x_3 ; así como la interacción x_1x_3 , resultaron significativos, al ser el valor de *p-value* menor al nivel de significancia. Las interacciones x_1x_2 y x_2x_3 , no obstante siendo no significativo, no se removió de la ecuación ya que está formado por dos términos que sí fueron significativos.

b. Efecto de los ingredientes sobre la luminosidad de las fresas recubiertas

Las Figuras 24 y 25 muestran la superficie de respuesta y el gráfico de contornos, respectivamente; para la luminosidad de las fresas frescas refrigeradas, en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3).

La Figura 26 muestra los denominados “Trazos de Cox”. La goma de tara tiene una influencia positiva sobre la luminosidad hasta concentraciones cercanas a 0,5 % aproximadamente. Mayores concentraciones a ésta, hicieron disminuir ligeramente la luminosidad. Algo similar fue hallado por Pastor (2010), quien encontró que los fresones recubiertos presentaron mayor luminosidad que los no recubiertos, cuanto mayor fue la proporción de hidrocoloide en la formulación, esto debido a una menor pérdida de humedad superficial que evitaría oxidaciones causantes de un color oscuro (Vargas *et al.* 2006).

Respecto a la influencia de la cera de abeja sobre la luminosidad, se observa que hacia ambos lados de la coordenada de referencia (0,25 %); la luminosidad se incrementa, siendo mínima en dicha concentración de cera. También se afirma que la cera de abeja es el componente con mayor influencia positiva sobre la luminosidad, ya que el mayor valor estimado que se observa (cercano a 31) le corresponde a la concentración más alta de cera (0,5 % en este estudio).

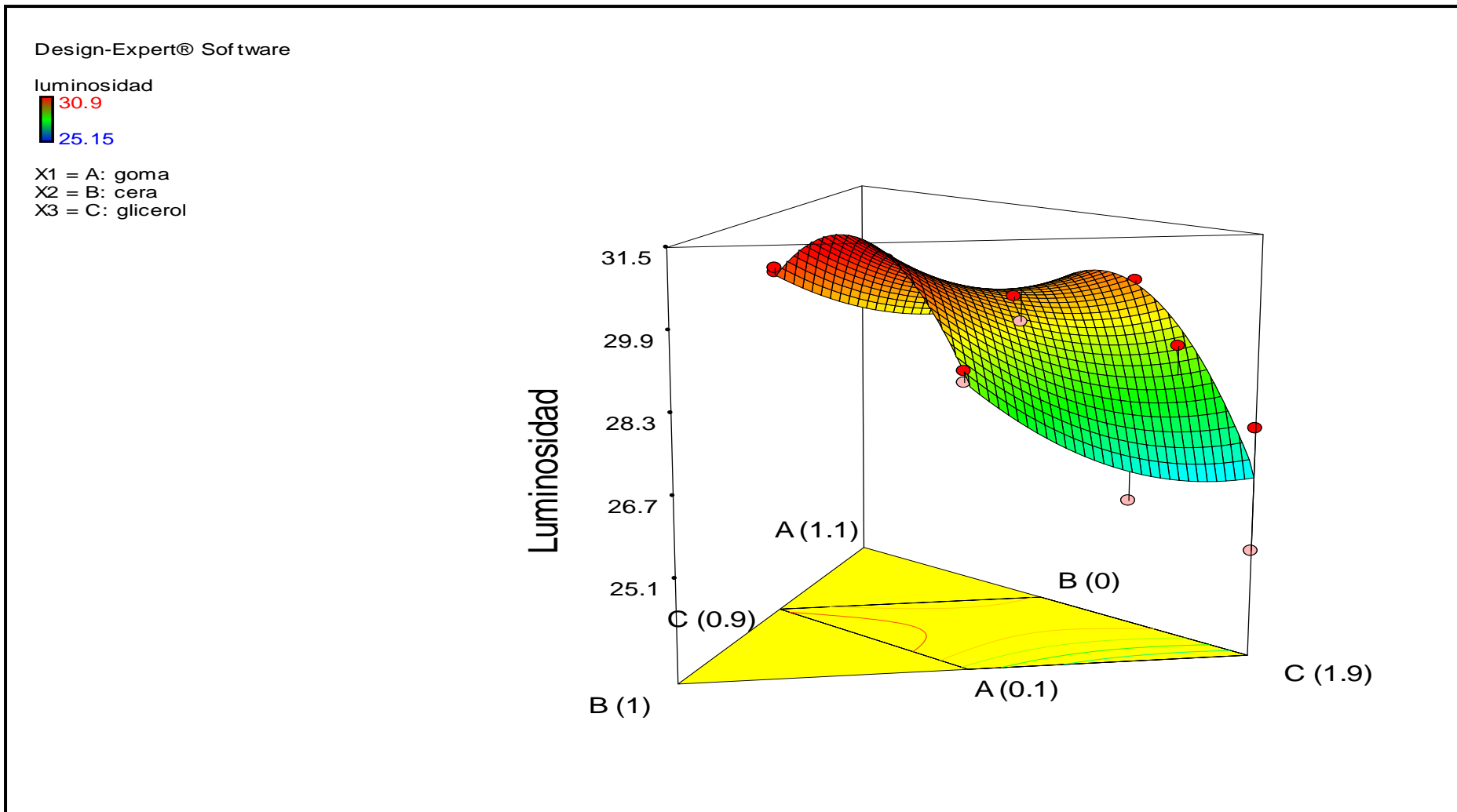


Figura 24: Superficie de respuesta para la luminosidad de las fresas recubiertas en función del porcentaje de goma de tara (x_1), cera de abeja (x_2) y glicerol (x_3).

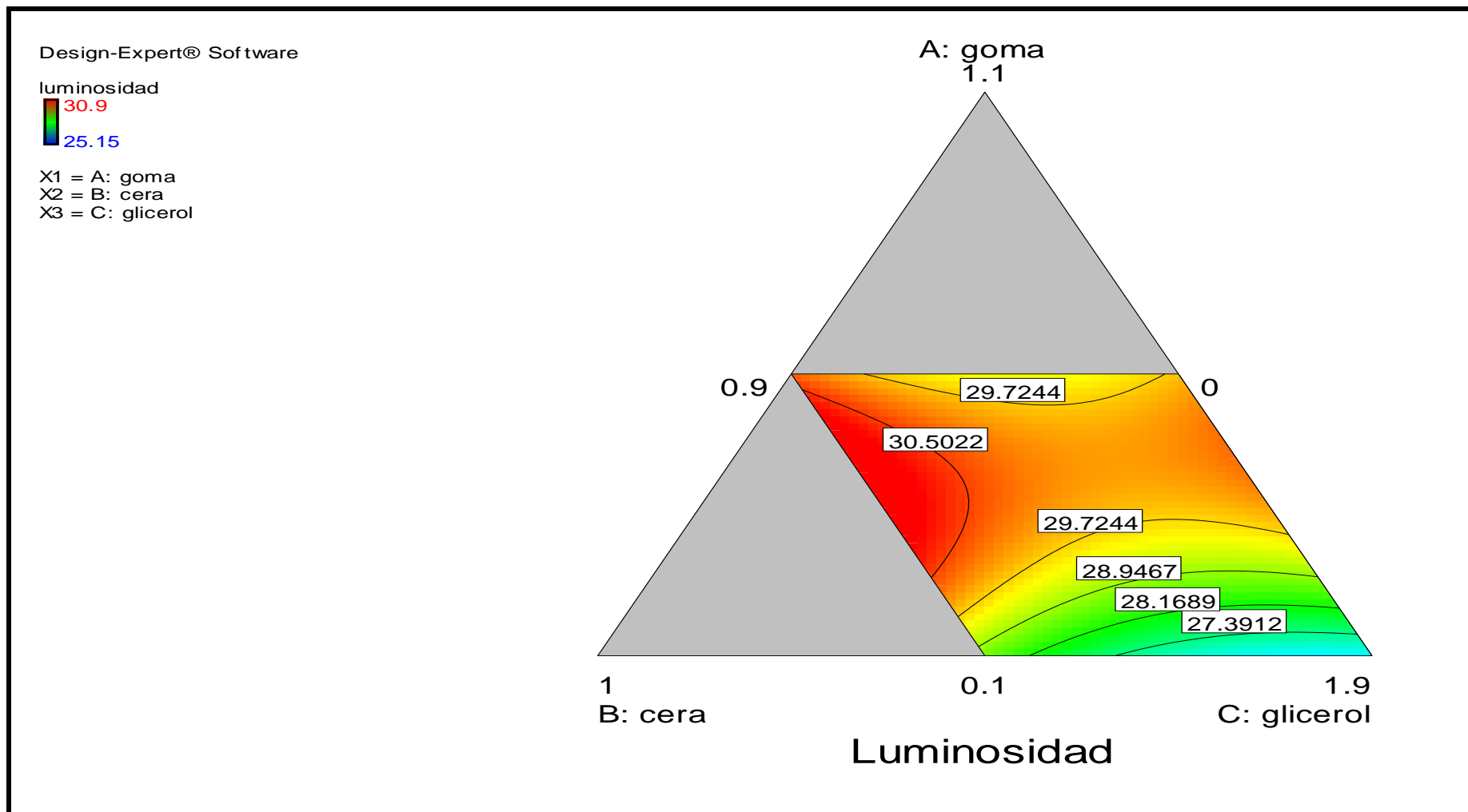


Figura 25: Contornos de la superficie de respuesta para la luminosidad de las fresas recubiertas.

Design-Expert® Software

luminosidad

Actual Components

A: goma = 0.350

B: cera = 0.250

C: glicerol = 1.400

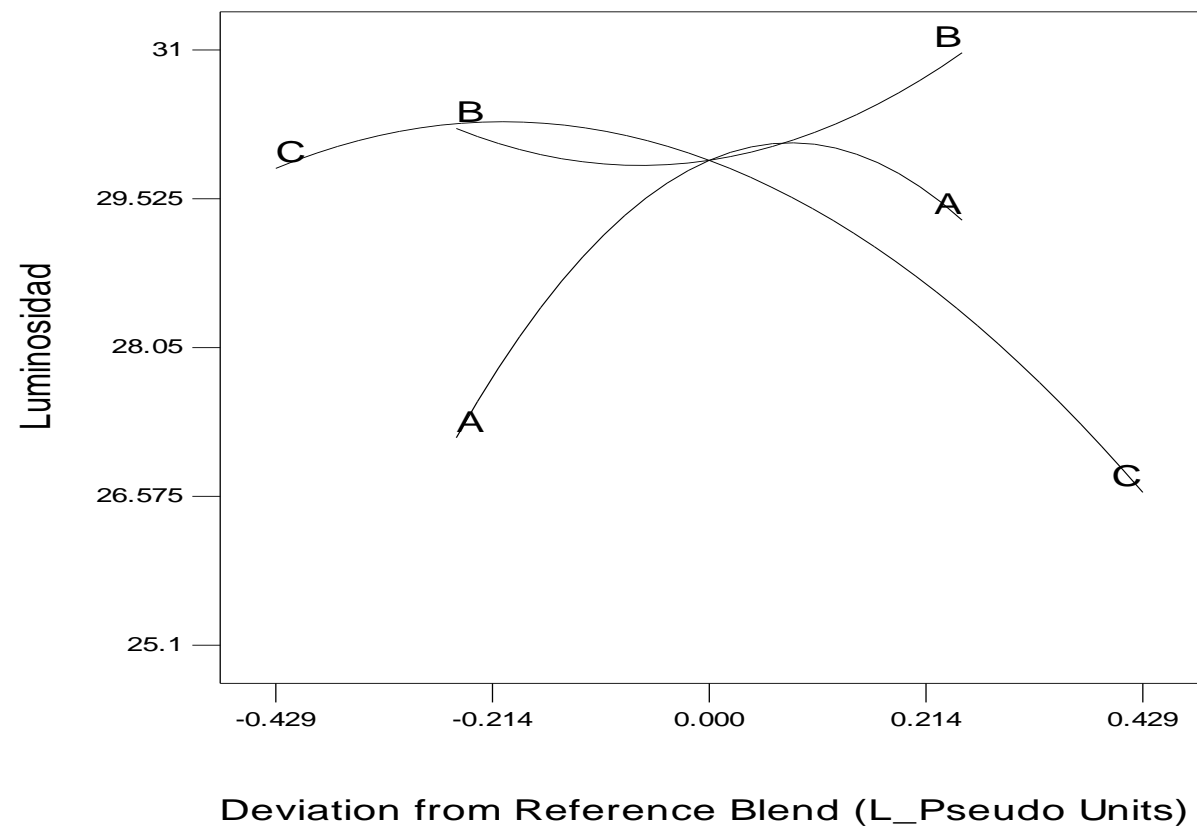


Figura 26: Trazos de Cox para la evaluación del efecto de cada ingrediente sobre la luminosidad de las fresas recubiertas.

Respecto al contenido de glicerol, se observa que cuando este se incrementó desde valores de 0,9 % a 1,2 % aproximadamente; la luminosidad se incrementó hasta alcanzar el máximo, luego de lo cual la luminosidad disminuyó a medida que el contenido de glicerol se incrementó por encima de este rango.

4.3. OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA DE RESPUESTAS

El objetivo de la optimización fue encontrar aquella mezcla que cumpliera de la mejor forma con las restricciones establecidas, teniendo como límites los valores mínimos y máximos observados en cada variable respuesta:

- Luminosidad: maximizarla (el máximo entre 25,15 y 30,9)
- Firmeza: maximizarla (el máximo entre 365,98 y 505,55 gf).
- Pérdida de peso: minimizarla (el mínimo entre 12,38 % y 23 %).
- Tasa respiratoria: minimizarla (el mínimo entre 42,89 y 50,45 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹).

Por lo tanto, las funciones de deseabilidad para cada respuesta fueron las siguientes:

$$\text{Minimización de la pérdida de peso } d_1 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_1 \geq 23 \\ \left[\frac{\hat{Y}_1 - 23}{12,38 - 23} \right] & \text{si } 12,38 \leq \hat{Y}_1 \leq 23 \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_1 \leq 12,38 \end{cases} \quad (30)$$

$$\text{Maximización de la firmeza } d_2 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_2 \leq 365,98 \\ \left[\frac{\hat{Y}_2 - 365,98}{505,55 - 365,98} \right] & \text{si } 365,98 \leq \hat{Y}_2 \leq 505,55 \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_2 \geq 505,55 \end{cases} \quad (31)$$

$$\text{Minimización de la tasa respiratoria} \quad d_3 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_3 \geq 50,45 \\ \left[\frac{\hat{Y}_3 - 50,45}{42,89 - 50,45} \right] & \text{si } 42,89 \leq \hat{Y}_3 \leq 50,45 \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_3 \leq 42,89 \end{cases} \quad (32)$$

$$\text{Maximización de la luminosidad} \quad d_4 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_2 \leq 25,15 \\ \left[\frac{\hat{Y}_2 - 25,15}{30,9 - 25,15} \right] & \text{si } 25,15 \leq \hat{Y}_2 \leq 30,9 \\ 1 & \text{si } \hat{Y}_2 \geq 30,9 \end{cases} \quad (33)$$

En la Tabla 18 se muestra la formulación óptima determinada por el programa *Design Expert*® versión 7.0, que cumplió con las restricciones impuestas. Cabe resaltar que para el presente trabajo, todas las respuestas tuvieron el mismo peso en importancia.

En la Tabla 19 se puede observar el valor de la deseabilidad por cada respuesta (d_i) y el cálculo de deseabilidad global (D), proveniente de aplicar el recubrimiento óptimo en las fresas. Cada deseabilidad individual presentó valores cercanos a uno, lo cual indica que cumplieron casi en su totalidad con las restricciones impuestas; salvo en el caso de la tasa respiratoria, cuyo valor de deseabilidad no es tan alto ya que el valor teórico (45,88) obtenido es superior al mínimo observado (42,89), no obstante se encuentra en el rango entre el mínimo y el máximo observado.

Derringer y Suich (1980), indican que el valor de d_i aumenta a medida que la “deseabilidad” de la correspondiente respuesta también aumenta.

Tabla 18: Composición y variables respuestas obtenidas tras la optimización simultánea de respuestas con el programa *Design Expert*®.

Formulación	Composición			Variables respuestas teóricas			
	Goma de Tara P1 %	Cera de Abeja P2 %	Glicerol P3 %	Pérdida de peso (%)	Firmeza (gf)	Tasa de Respiración mgCO ₂ ·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	Luminosidad (L*)
Formulación Óptima	0,46	0,31	1,22	12,43	505,55	45,28	30,21

Tabla 19: Determinación de la deseabilidad global (D) para la formulación óptima.

Formulación	Variables Respuestas				d_1 Minimización de la pérdida de peso	d_2 Maximización de la firmeza	d_3 Minimización de la tasa respiratoria	d_4 Maximización de la luminosidad	Deseabilidad Global (D) ($d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4$) ^(1/4)
	Pérdida de peso (%)	Firmeza (gf)	Tasa de Respiración mgCO ₂ ·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	Luminosidad (L*)					
Formulación Óptima	12,43	505,55	45,28	30,21	0,995	1	0,685	0,88	0,88

Tabla 20: Variación de las variables respuestas entre el programa *Design Expert*[®] y la prueba experimental.

Origen de la Variable Respuesta	Composición de la Formulación Optima dada por el <i>Design Expert Software</i>			Variables Respuestas			
	Goma de Tara P ₁ %	Cera de Abeja P ₂ %	Glicerol P ₃ %	Pérdida de peso (%)	Firmeza (gf)	Tasa de Respiración mgCO ₂ ·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	Luminosidad (L*)
<i>Design Expert Software</i>	0,46	0,31	1,22	12,43	505,55	45,28	30,21
Prueba Experimental				12,39	500,75	45,88	30,97
Variación Prueba Experimental Vs <i>Design Expert</i>[®]				-0,28 %	-0,95 %	1,34 %	2,53 %

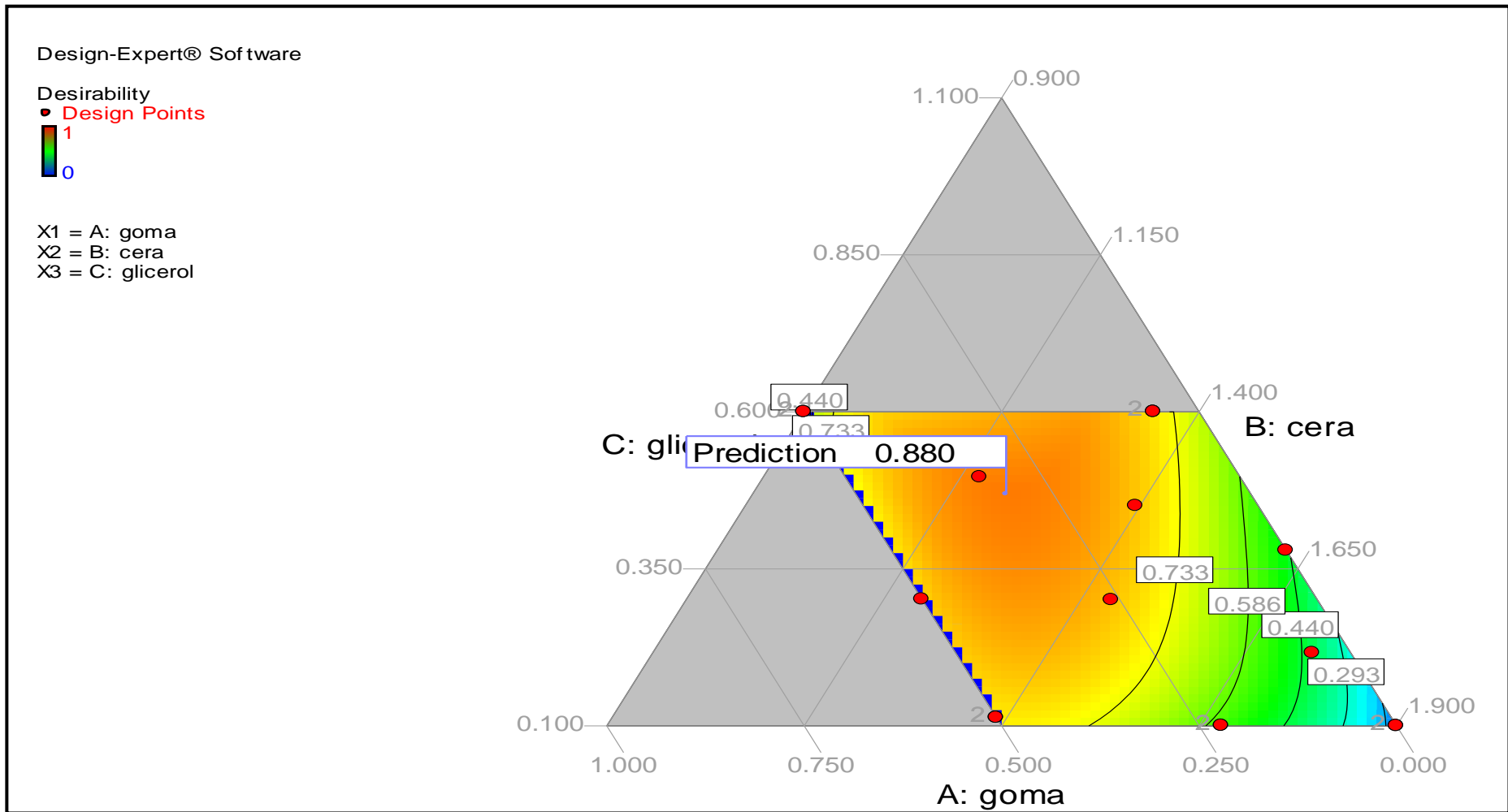


Figura 27: Gráfico de contornos mostrando el punto óptimo de la formulación y su deseabilidad global.

El valor de deseabilidad global (D) da una visión general de la deseabilidad de todas las variables respuestas combinadas. El valor obtenido ($D = 0,88$), al ser un valor próximo a uno; indica que existe un equilibrio favorable entre todas las variables respuestas estudiadas (Derringer y Suich, 1980). En la Figura 27 se presenta el gráfico de contornos, en el cual se muestra el punto óptimo de la formulación (el de mayor deseabilidad global).

Luego de determinar la fórmula óptima, se realizó una comparación de las respuestas de pérdida de peso, firmeza, tasa respiratoria y luminosidad; determinadas por el programa *Design Expert*® y la prueba experimental; con el fin de validar lo obtenido por el programa.

En la Tabla 20 se aprecian las variaciones de los resultados entre los valores teóricos dados por el programa y los valores obtenidos experimentalmente. Como se observa, las variaciones de la prueba experimental fueron muy pequeñas respecto a las teóricas; lo cual indica una correcta validación de los datos. Dichas variaciones podrían ser atribuidas a la materia prima, grado de emulsificación del recubrimiento, variaciones en las condiciones de la cámara climática, etc.

4.3.1. COMPARACIÓN DEL RECUBRIMIENTO ÓPTIMO Y EL CONTROL

a. Pérdida de peso

En la Figura 28 se observa que ambas muestras presentaron un incremento gradual en la pérdida de peso durante el almacenamiento. Esto se debe a que la fresa posee una piel muy delgada lo que la hace susceptible a una rápida pérdida de agua (Hernández *et al.*, 2008). Además, Aryanci y Tunc (2003), citados por Colla *et al.* (2006); indican que la pérdida de peso del fruto se debe a su proceso respiratorio, transferencia de humedad y algunos procesos de oxidación. El ANOVA mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) en la pérdida de peso de las fresas recubiertas respecto al tratamiento control en todos los días de almacenamiento (Anexo 5).

La pérdida de peso del control fue significativamente mayor que la fruta recubierta. Al final del almacenamiento el tratamiento control presentó una pérdida de peso promedio del 16,04 %, mientras que la fruta con el recubrimiento óptimo presentó una pérdida promedio de 12,4 %. Esto podría explicarse por la acción barrera que ejerce el recubrimiento, restringiendo la transferencia del agua y protegiendo la fruta del daño mecánico; así como sellando pequeñas heridas que aceleran la deshidratación (Hernández *et al.*, 2008). Asimismo los recubrimientos actúan como barreras selectivas al O₂ y CO₂, modificando la atmósfera interna y disminuyendo así la tasa de respiración, lo cual resulta en una reducción de la pérdida de peso (Debeaufort *et al.* 1998; citado por Atrass *et al.*, 2010).

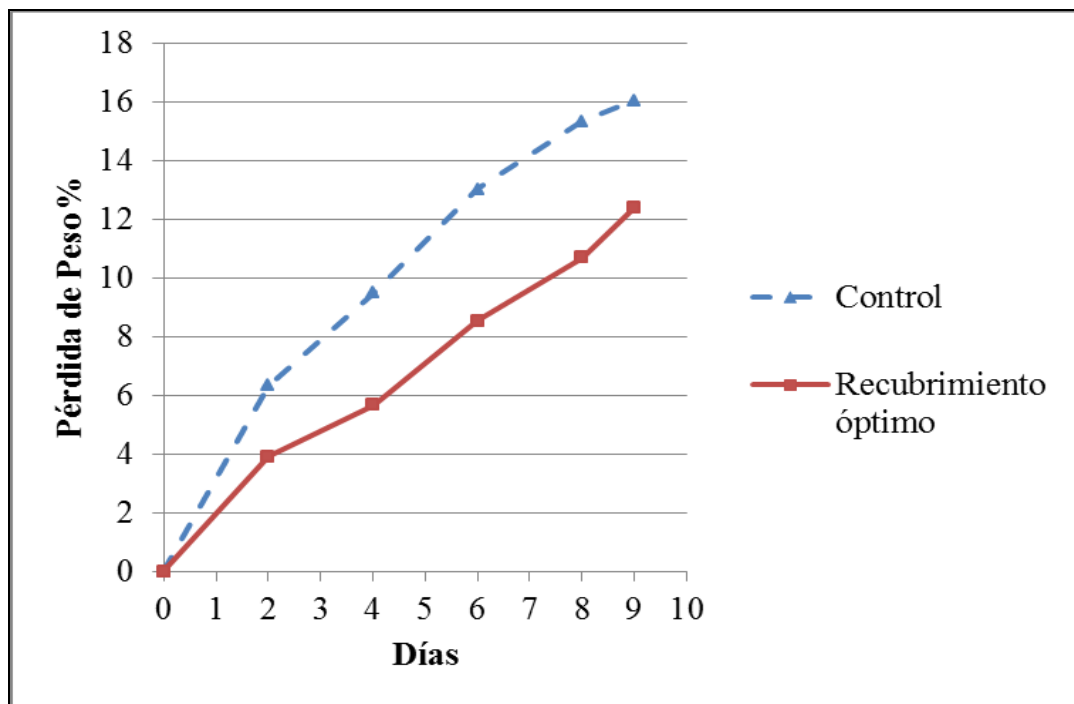


Figura 28: Evolución del porcentaje de la fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir (control), durante su almacenamiento de 9 días a 5 °C.

Otros autores también han reportado menores pérdidas de peso en fresas recubiertas que en fresas sin recubrir, tales como: Restrepo y Aristizábal (2010) que aplicaron en fresas recubrimientos a base de gel de sábila y cera carnauba, que presentaron pérdidas 40 % menos respecto al control. Hernández (2008) evidenció, luego de seis días de almacenamiento a 10 °C, pérdidas de peso del 19,2 y 14,6 % en fresas

recubiertas con quitosano al 1 y 1,5 %, respectivamente; frente a un 28,7 % de las fresas sin recubrir. Colla *et al.* (2006) aplicó sobre fresas un recubrimiento a base de harina de *Amaranthus cruentus* y ácido esteárico, presentando pérdida de peso de 23 % luego de 18 días a 7 °C; frente al control que presentó pérdidas de más del 35 %. Trejo *et al.* (2007) encontró al final del almacenamiento por 10 días a 5°C y 85% HR, que las fresas sin recubrimiento presentaron una pérdida de peso de 13% y las fresas con recubrimiento de gelatina aproximadamente un 6%.

El envase utilizado también jugó un papel importante en la reducción de pérdida de peso ya que ésta se puede reducir drásticamente mediante el envasado del fruto con materiales poliméricos de alta barrera al agua, aunque también pueden usarse materiales con perforaciones con las que minimizar las condiciones hipóxicas producidas en la atmósfera del envase para algunos productos (Almenar, 2005).

b. Firmeza

En la Figura 29 se observa que ambas muestras (fresas recubiertas y control), presentaron una disminución progresiva de su firmeza durante todo el almacenamiento. La pérdida de firmeza en fresas, probablemente se deba a la degradación de la lamela media de las células del parénquima cortical, resultando en un incremento dramático de la solubilización de la pectina, con leves cambios en el peso molecular de la pectina y pequeñas disminuciones en el contenido de hemicelulosa; lo que resulta en el ablandamiento del fruto (Koh y Melton, 2002; citados por Hernández *et al.*, 2008).

El ANOVA mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) en la firmeza de las fresas recubiertas respecto a las fresas control durante todo el tiempo de almacenamiento, excepto en el primer día (Anexo 6). El valor inicial promedio de firmeza para la materia prima fue de 613 gf. El recubrimiento preservó mejor la firmeza del fruto, ya que ésta fue mayor a la firmeza del control durante casi todo el tiempo de almacenamiento. Asimismo, la fresa recubierta presentó una pérdida total de firmeza de 18,24 %, mientras que el control una pérdida total de 20,72 %.

Era de esperarse que las fresas recubiertas preservaran mejor la textura, ya que al presentar menor pérdida de peso que el control y por ende una menor pérdida de agua; también presentaron una menor modificación de la textura. Esto indica que el recubrimiento controla la migración de humedad desde las fruta, por lo tanto controla la integridad y textura de las fresas durante su almacenamiento en refrigeración (Colla *et al.*, 2006).

La retención de la firmeza en fresas recubiertas está acorde con Atrass *et al.* (2010) quienes encontraron que fresas recubiertas con películas de soya y gluten, ambas con timol, presentaron una firmeza significativamente mayor a la del control durante el almacenamiento. Asimismo Hernández *et al.* (2008) hallaron que hacia el final del almacenamiento todos los recubrimientos a base de 1 y 1,5 % de quitosano dieron valores de firmeza más elevados que la fresa sin tratar. Por otro lado, Restrepo y Aristizábal (2010) encontraron que fresas recubiertas con aloe vera y cera carnauba, preservaron la firmeza de las fresas después de 10 días de almacenamiento a 5 °C; presentando valores de 850 gf, mientras que la firmeza de la fresa sin recubrir presentó 390 gf luego del tiempo en mención.

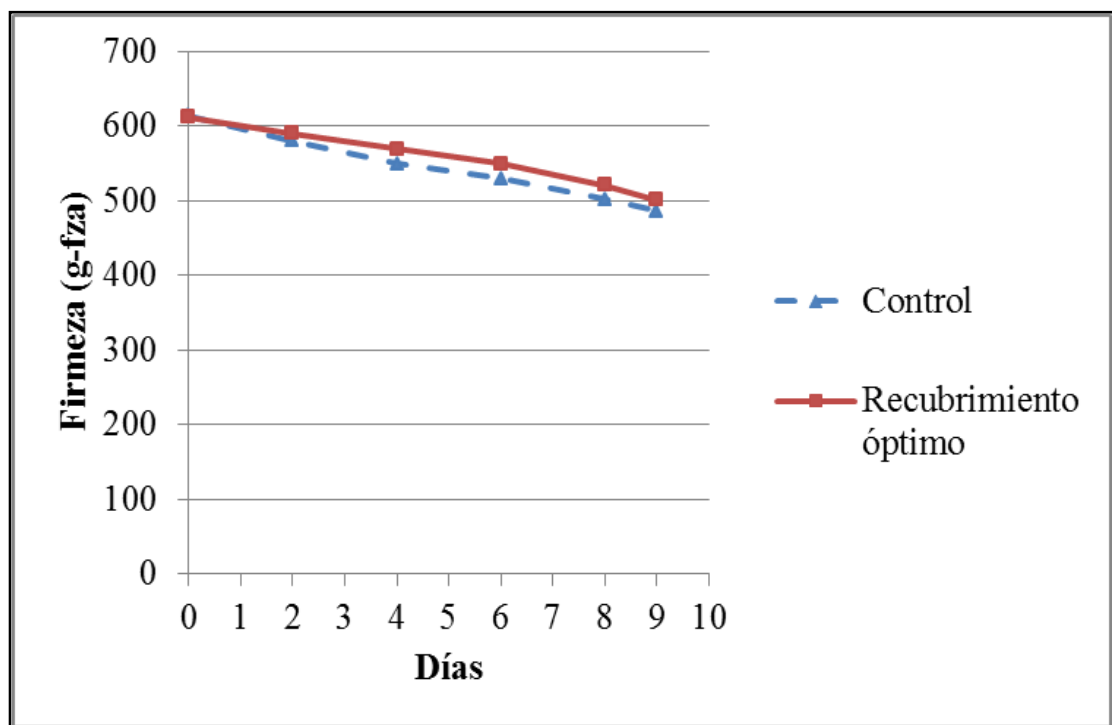


Figura 29: Evolución de la firmeza de la fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir (control), durante su almacenamiento de 9 días a 5 °C.

c. Tasa Respiratoria

En la Figura 30 se muestra la evolución de la tasa respiratoria, expresada en $\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, del fruto con recubrimiento óptimo y el fruto control; durante el tiempo de almacenamiento a 5 °C. Según el análisis estadístico (Anexo 7), existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambos tratamientos durante todo el tiempo de almacenamiento; siendo siempre menor la tasa respiratoria del fruto recubierto que la del fruto control (sin recubrir).

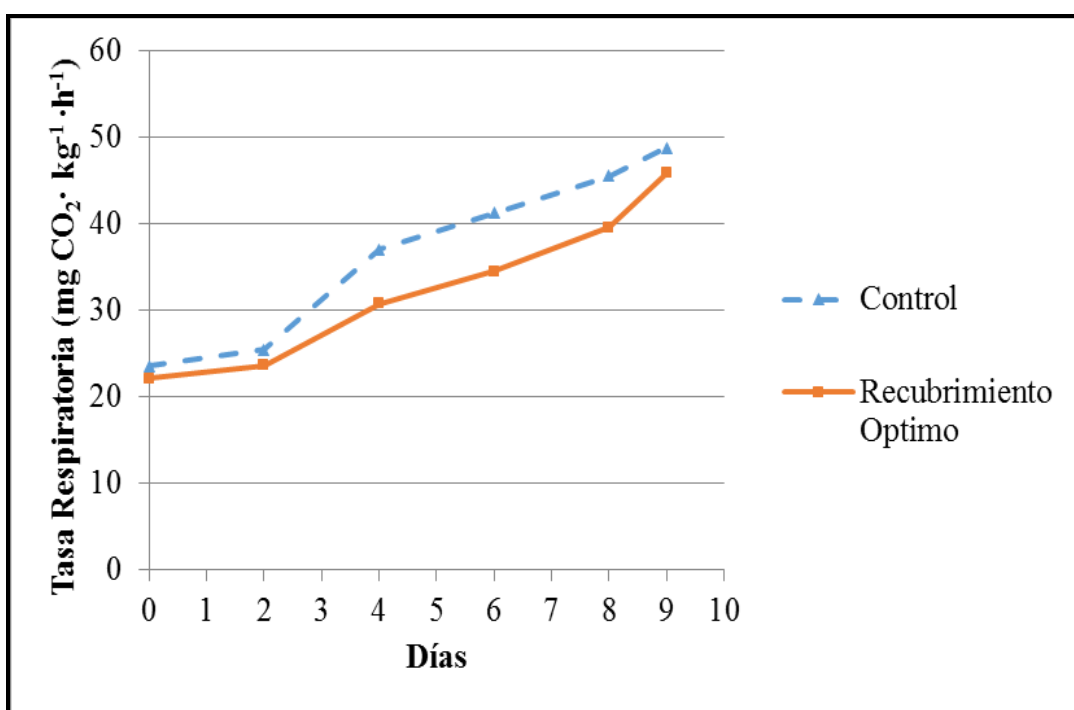


Figura 30: Evolución de la tasa respiratoria ($\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) de la fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir (control), durante su almacenamiento de 9 días a 5 °C.

Las fresas con recubrimiento óptimo presentaron valores de tasa respiratoria iniciales de $22,1 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ y al final del almacenamiento valores promedio de $45,82 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; mientras que el control presentó valores que fueron desde $23,6 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ hasta $48,8 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Como se observa en la Figura 30, ambos tratamientos presentan un ascenso en su tasa respiratoria durante todo el tiempo de almacenamiento. Comportamiento similar al fruto control ha sido reportado por Restrepo y Aristizábal (2010), quienes hallaron un ascenso en la tasa respiratoria del control desde 21 hasta 41,88 $\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ durante 10 días de almacenamiento a 5°C. Para el caso de las fresas recubiertas con mucílago de sábila la tasa respiratoria se mantuvo entre 23,72 y 22,05 $\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, sin presentar mayores cambios. Por otro lado Hernández *et al.* (2008) hallaron un ascenso en la tasa respiratoria de las fresas sin recubrir desde 27 hasta 32 $\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, luego de 6 días de almacenamiento a 10 °C. Sin embargo, hallaron un descenso de la tasa respiratoria en fresas recubiertas con mucílago de sábila que fue desde 40 a 45 $\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ en el primer día hasta 25 a 30 $\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ al final del almacenamiento. Los diferentes comportamientos en el patrón de la tasa respiratoria dependerán del tipo de recubrimiento, condiciones de almacenamiento, etc.

A pesar que ambas muestras tuvieron el mismo patrón de comportamiento, es notable que la fruta recubierta presentó menores valores de tasa respiración durante todo el almacenamiento, debido a la modificación de la atmósfera interna que ha sido sugerida como la causante de la reducción de la producción de CO_2 en frutas recubiertas. A este respecto, la propiedad barrera a los gases de los recubrimientos comestibles aplicados a la superficie de la piel del fruto y la dependencia a la humedad relativa y temperatura jugará un rol importante en los cambios de los niveles de O_2 y CO_2 .

Cabe mencionar también que los frutos recubiertos y en mayor medida los frutos control; presentaron un evidente crecimiento de moho gris después del día 7 de almacenamiento, el cual ocasiona daños estructurales en los tejidos, permite su ablandamiento y favorece procesos fermentativos que aportan CO_2 , que fue retenido en la cámara de gas (Redondo-Nevado *et al.*, 2001 citados por Restrepo y Aristizábal, 2010; Almenar, 2005 y Hernández *et al.*, 2008).

d. Luminosidad

En la Figura 31 se aprecia que la luminosidad de ambas muestras disminuye durante todo el almacenamiento. El ANOVA evidenció la existencia de diferencias significativas entre los frutos con recubrimiento óptimo y el control durante todo el tiempo de almacenamiento; siendo la luminosidad de la fruta recubierta mayor a la del fruto control desde el inicio hasta el final del almacenamiento. Al final del almacenamiento, L* disminuyó en promedio 9,2 % para el control y en 2,8 % para el recubrimiento óptimo. La disminución del valor de L* durante el almacenamiento, evidencia el oscurecimiento de la piel del fruto, debido a la oxidación y pérdida de humedad que sufren las fresas (Tanada y Grosso, 2005; citados por Restrepo y Aristizábal, 2010).

Asimismo la prueba LSD de comparaciones múltiples, indicó que la luminosidad de las fresas con recubrimiento óptimo no presentó diferencias significativas los dos primeros días, luego del cual evidenció una disminución leve. Esto podría explicarse debido a la presencia de la cera de abeja, ya que esta hace que el recubrimiento presente una mayor resistencia al vapor de agua; evitando así la pérdida de humedad superficial que podría ser la causante de un color más oscuro (Vargas *et al.*, 2006).

Como era de esperarse el control evidenció disminución y diferencias significativas durante los seis primeros días; tal y como se aprecia en el Anexo 8. Cabe resaltar que al momento de la aplicación (día cero), el recubrimiento mejora la luminosidad natural de la fresa, presentando valores de 31,86; mientras que las fresas control presentó valores de 28,81.

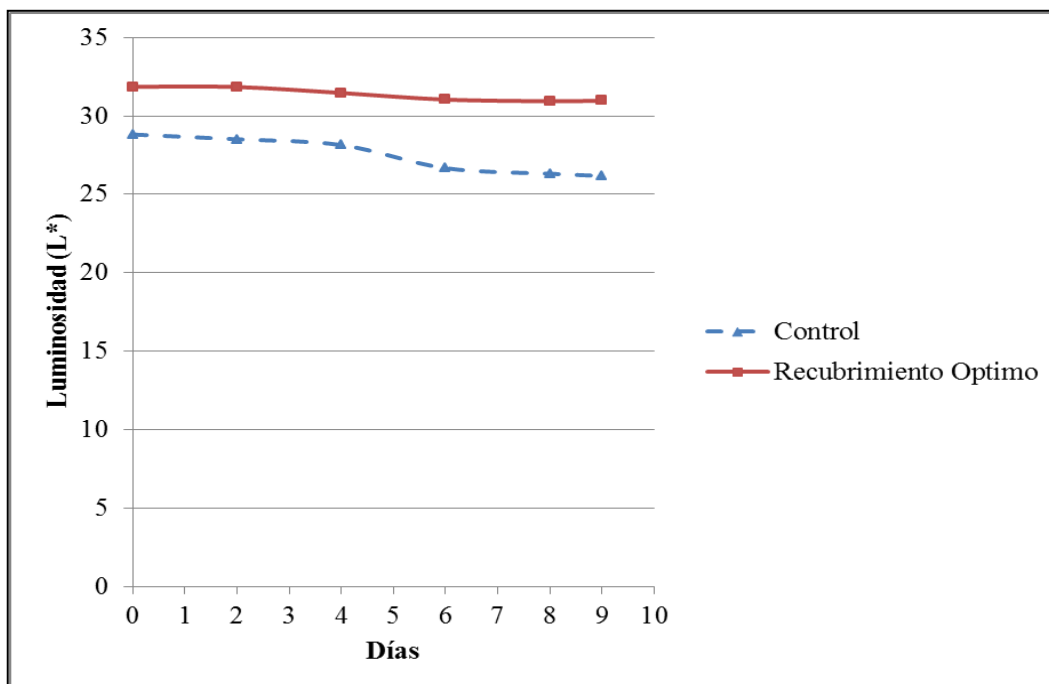


Figura 31: Evolución de la luminosidad de la fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir (control), durante su almacenamiento de 9 días a 5 °C.

La protección del color y luminosidad del fruto de la fresa, debido a la utilización de recubrimientos comestibles, también ha sido evidenciada por Vargas *et al.* (2006), quienes utilizaron recubrimiento a base de quitosano y ácido oleico, el cual preservó la luminosidad en valores entre 32 y 34 luego de 10 días de almacenamiento a 4 °C; mientras que el control no duró hasta ese día debido a la infección fúngica. Del mismo modo Hernández *et al.* (2008), observaron que el parámetro L* fue menor en las fresas sin recubrir que en las recubiertas con quitosano, teniendo que en el control L* decreció un 27 % (desde 32 hasta 23 aproximadamente) y en la película con quitosano al 1,5 %, L* decreció un 7 % (desde 32 hasta 29 aproximadamente) luego de 6 días de almacenamiento a 10 °C. Por su lado Atrass *et al.* (2010) encontraron que las fresas sin ningún recubrimiento presentaron color más oscuro (valores bajos de L*) que las recubiertas con películas de soya o gluten, las cuales presentaron colores más claros (valores altos de L*).

e. **Conteo de Mohos**

Respecto al conteo de mohos, presentado en el Anexo 9, éste se eligió por ser el crecimiento del hongo *Botrytis cinérea* la principal causa de podredumbre en la fresa (Almenar, 2005). El valor umbral para el criterio microbiológico fue un número igual o mayor a 10^3 UFC/g de mohos que hace la fruta no apta para el consumo y que es recomendado por Beltrán *et al.* (2010).

Según los resultados obtenidos, se puede evidenciar que la desinfección realizada a la fruta es apropiada ya que los conteos hallados de mohos en el día cero están por debajo del límite de cuantificación del método. Asimismo se observa que la calidad microbiológica de la fresa recubierta está por debajo del valor umbral hasta el día 8, por lo que; si bien los parámetros físico químicos evaluados son aún aceptables hasta el día 9, el mayor crecimiento de mohos coadyuvaría a un detrimento más rápido de dichos parámetros a partir del día 9 en adelante.

4.4. **CARACTERIZACION DEL PRODUCTO FINAL**

Los resultados obtenidos de las fresas recubiertas se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21: Caracterización del producto final al inicio del almacenamiento.

Característica	Fresa recubierta	Control
	Valor (b.s.)	Valor (b.s.)
Humedad	957,3 % \pm 3,11	795,4% \pm 3,5
Acidez	11,15 % \pm 0,07	9,68% \pm 1,46
pH	3,49 \pm 0,01	3,5 \pm 0,025
Sólidos solubles	76,48 % \pm 0,3	74,52 % \pm 0,28

Respecto al contenido de humedad, este fue mayor al control ($p < 0,05$). Esto podría indicar que el recubrimiento aporta cierto grado de humedad a la superficie del fruto.

En cuanto a la acidez y pH, no presentaron diferencias significativas respecto al control; lo cual indica que no fueron afectados por la aplicación del recubrimiento. Comportamiento similar encontraron Vargas *et al.* (2006), Trejo *et al.* (2007), Pastor (2010), Restrepo y Aristizábal (2010) y Saavedra y Algecira (2010); quienes no encontraron diferencias significativas en estos mismos parámetros entre fresas recubiertas y fresas sin recubrir al inicio de su almacenamiento.

En cuanto al contenido de sólidos en la fresa recubierta, este fue ligeramente mayor al del control, debido probablemente a que los componentes del recubrimiento incrementan esta medida.

V. CONCLUSIONES

1. Los valores de pérdida de peso, firmeza, tasa respiratoria y luminosidad de las fresas recubiertas, fueron sensibles a los cambios realizados en las concentraciones de los tres ingredientes en estudio: goma de tara, cera de abeja y glicerol.
2. La goma de tara tuvo la mayor influencia positiva sobre la pérdida de peso y la firmeza, ya que una concentración cada vez mayor de ésta (dentro del rango de 0,1 a 0,6 %) originó valores de pérdida de peso cada vez menores y de firmeza cada vez mayores.
3. La cera de abeja fue el componente que tuvo la mayor influencia positiva sobre la tasa respiratoria y la luminosidad. Conforme su concentración aumentó de 0 a 0,5 %, la tasa respiratoria disminuyó. Cuando la concentración de cera estuvo por debajo y encima de 0,25 % se incrementó la luminosidad y los mayores valores que se observaron (cerca de 31) se correspondieron con la concentración más alta (0,5 %).
4. La formulación óptima del recubrimiento comestible, tuvo la siguiente composición en base a los tres ingredientes principales: 0,47 % de goma de tara, 0,3 % de cera de abeja y 1,22 % de glicerol.
5. El recubrimiento óptimo logró minimizar la pérdida de peso hasta un valor de 12,39%, logró maximizar la firmeza hasta un valor de 500,75 gf de firmeza, logró minimizar la tasa respiratoria hasta un valor de 45,88 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹ y logró maximizar la luminosidad hasta un valor de 30,97 s.u. Siendo estos valores mejores que los del fruto control.

VI. RECOMENDACIONES

- Hacer un estudio de tiempo de vida utilizando el recubrimiento óptimo, pero haciendo uso de diferentes antimicrobianos para incrementar la vida útil de la fresa.
- Utilizar el recubrimiento óptimo como vehículo para la adición de vitaminas, antioxidantes, etc. y realizar estudios nutricionales y sensoriales de la fresa.
- Determinar la vida útil sensorial de la fresa con el recubrimiento óptimo hallado.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, M. 2005. Propiedades Físicas y Mecánicas de Películas Biodegradables y su empleo en el recubrimiento de frutos de aguacate. Tesis M. Sc. México. Instituto Politécnico Nacional. 112 p.
- Almenar, E. 2005. Envasado activo de fresas silvestres. Tesis Dr. Valencia, ES. Universidad de Valencia. 286 p.
- A.O.A.C. (Association of Official Analytical Chemist, US). 2007. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemist. 18 ed. Washington D.C.
- AREX (Asociación Regional de exportadores de Lambayeque). 2013. Perfil Comercial de la Fresa. Consultado 22 ago. 2015. Disponible en: <http://www.sierraexportadora.gob.pe/perfil-comercial-de-la-fresa/>.
- Atress, A.; El-Mogy, M.; Aboul, H. y Alsanius, B. 2010. Improving strawberry fruit storability by edible coating as a carrier of thymol or calcium chloride. *Journal of Horticultural Science & Ornamental Plants* 2(3): 88-97.
- Baraona, M. y Sancho, E. 1992. Fruticultura especial: manzana, melocotón, fresa y mora. Costa Rica. Editorial Universidad Nacional a Distancia. 145 p.
- Beltrán, A.; Ramos, M. y Alvarez, M. 2010. Estudio de la vida útil de fresas (*Fragaria vesca*) mediante tratamiento con radiación ultravioleta de onda corta (UV-C). *Revista Tecnológica ESPOL - RTE* 23(2): 17-24.
- Bondari, K. 2005. Mixture Experiments and Their Applications in Agricultural Research. SAS® Users Group International: Conference 30. Pensilvania. SAS Institute Inc. Paper 209/30: 1-8. Disponible en: <http://www2.sas.com/proceedings/sugi30/toc.html>
- Bourtoom, T. 2008a. Edible films and coatings: characteristics and properties. *International Food Research Journal* 15(3):237-248.
- Bourtoom, T. 2008b. Plasticizer effect on the properties of biodegradable blend film from rice starch-chitosan. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology* 30 (1): 149-155.

- Brazanti, E. 1989. La Fresa. Madrid. Mundi Prensa. 386 p.
- Cerqueira, M.; Lima, A.; Teixeira, J.; Moreira, R. y Vicente, A. 2009. Suitability of novel galactomannans as edible coatings for tropical fruits. *Journal of Food Engineering* 94: 372-378.
- Codex Alimentarius. 1981. NORMA DEL CODEX PARA LAS FRESAS CONGELADAS RAPIDAMENTE CODEX STAN 52-1981.
- Colla, E.; Sobral, P. y Menegalli, F. 2006. Effect of composite edible coating from *Amaranthus cruentus* flour and stearic acid on refrigerated strawberry (*Fragaria ananassa*) quality. *Latin American Applied Research* 36: 249-254.
- Collazos, C.; White, P.; White, H.; Viñas, E.; Alvistur, E.; Urquieta, R.; Vásquez, J.; Días, C.; Quiroz, A.; Roca, A.; Hegsted, D. y Bradfield, R. 1996. La composición de los alimentos peruanos. 7 ed. Lima, PE.
- Cornell, J. 2002. *Experiments with Mixtures: Designs Models and the Analysis of Mixture Data*. 3 ed. New York. John Wiley & Sons, Inc. 649p.
- Cubero, N.; Monferrer, A.; Villalta, J. 2002. *Aditivos Alimentarios*. España. Madrid Vicente Ediciones. 240 p.
- Derringer, G. y Suich, R. 1980. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology* 12(4): 214-219.
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas. 2002. Reglamento (CE) No 843/2002 de la comisión del 21 de mayo del 2002 por el que se establecen las normas de comercialización de las fresa. L134:24.
- Durango, A.; Soares, N. y Arteaga, M. 2011. Filmes y revestimientos comestibles como empaques activos biodegradables en la conservación de alimentos. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 9(1): 122-128.
- Espinoza, M. 2009. Estudio de Pre-Factibilidad para la exportación de fresa congelada al mercado de Estados Unidos. Tesis Ing. Ind. Lima, PE, PUCP. 100 p.
- Fonseca, S.; Oliveira, F. y Brecht, J. 2002. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *Journal of Food Engineering* 52: 99–119.
- FDA (Food and Drug Administration, US). 2006. Food additives permitted for direct addition to food for human consumption. Subpart C: Coatings, Films and Related Substances (en línea). Code of Federal Regulations, Title 21, Volume 3. Consultado 13 abr. 2015. Disponible en: <http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfCFR/CFRSearch.cfm?CFRPart=172>.

- FSANZ (Food Standards Australia New Zealand, AT). 2006. Final Assessment Report – Application A546: Tara gum as a food additive (en línea). Consultado 12 ene. 2015. Disponible en: <http://www.foodstandards.gov.au/foodstandards/applications/applicationa546tarag9904.cfm>
- Fuentes, 1998. Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta procesadora de goma de tara (*Caesalpinia tinctoria*) en el departamento de Ayacucho. Tesis Ing. Ind. Al. Lima, PE, UNALM. 176 p.
- González, V. 2010. Conservación de Mora, Uvilla y Frutilla mediante la utilización de aceite esencial de canela (*Cinnamomum zeylanicum*). Tesis Bioquímico Farmacéutico. Riobamba, EC. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de 117 p.
- Goycochea, R. 2010. Evaluación de taninos y goma del fruto de la tara *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze provenientes de las lomas de Atiquipa, Arequipa – Perú. Tesis Ing. Ind. Al. Lima, PE, UNALM. 95 p.
- Greener, D. y O. Fennema. 1993. Water Vapor and Oxygen Permeability of Wax Films. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 70(9):867-873.
- Gutiérrez, P. 2008. Evaluación del uso de una mezcla de estabilizantes conteniendo goma de tara en la elaboración de helados. Tesis Ing. Ind. Al. Lima, PE. UNALM. 141 p.
- Hare, L. 1974. Mixture designs applied to food formulations. *Food Technology – Malaysia* 37(7): 739-744.
- Hernández, P.; Almenar, E.; Del Valle, V.; Velez, D. y Gavara, D. 2008. Effect of chitosan coating combined with postharvest calcium treatment on strawberry (*Fragaria ananassa*) quality during refrigerated storage. *Food Chemistry* 110: 428-435.
- ICMSF (International Commission on Microbiological Specifications for Foods). 1985. *Ecología microbiana de los Alimentos 2. Productos alimenticios*. Editorial Acibria, S.A. Zaragoza-España. Vol. II.
- INCAP (Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, GT). 2007. *Tabla de composición de alimentos de Centro América*. 2 ed. Guatemala. Serviprensa S.A. 137p.
- Kester, J. y Fennema, O. 1986. Edible films and coatings: A review. *Food Technology (USA)* 40:47–59.
- Kuhn, M. 2014. The desirability package (en línea). Consultado 01 dic. 2014. Página web disponible en: <http://cran.r-project.org/web/packages/desirability/vignettes/desirability.pdf>.
- Martínez, M.; Nieto, D.; Téliz, D.; Rodríguez, J.; Martínez, Ma.; Vaquera, H. y Carillo, O. 2008. Comparación Cualitativa de Fresas (*Fragaria ananassa* Duch.) de Cultivares Mexicanos y Estadounidenses. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 14(2): 113-119.

- Meza, A. 2006. Desarrollo de Películas o Recubrimientos Comestibles con Potencial para el Recubrimiento de Frutas Frescas. Proyecto Tesis Mg Sc. Iztapalapa, ME. Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa. 55p
- MINAG (Ministerio Nacional de Agricultura, PE). 2008. Estudio de la fresa en el Perú y el mundo (en línea). Consultado 15 ene. 2015. Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.minag.gob.pe/download/pdf/herramientas/boletines/estudio_fresa.pdf.
- Mohd, A; Cheow, C; Norizzah, A; Halimahton, M; Adi, M; Noorakmar, A; Ruzaina, I. 2011. Optimization of process conditions for the application of edible coating emulsion on guava (*Psidium guajava*) using response surface methodology.
- Morillón, V.; Debeaufort, F.; Blond, G.; Capelle, M. y Voilley, A. 2002. Factors affecting the moisture permeability of lipid-based edible films: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 42 (1): 67-89.
- Navarro, M. 2007. Efecto de la composición de recubrimientos comestibles a base de hidroxipropilmetilcelulosa y cera de abeja en la calidad de ciruelas, naranjas y mandarinas. Tesis Dr. Valencia, ES. Universidad Politécnica de Valencia. 208 p.
- Nunes, M. 2007. Caracterización y procesado de kiwi y fresa cultivados por diferentes sistemas. Tesis Dr. Santiago de Compostela, ES. USC. 257 p.
- Ouattara, B.; Sabato, S. y Lacroix, M. 2002. Use of gamma-irradiation technology in combination with edible coating to produce shelf-stable foods. *Radiation Physics and Chemistry* 63: 305–310
- Pastor, C. 2010. Recubrimientos comestibles a base de hidroxipropilmetilcelulosa: caracterización y aplicación. Tesis Dr. Valencia, ES. Universidad Politécnica de Valencia. 219 p.
- Ramos, M.; Bautista, S.; Barrera, L.; Bosquez, E.; Alía, I. y Estrada, M. 2010. Compuestos antimicrobianos adicionados en recubrimientos comestibles para uso en productos hortofrutícolas. *Revista Mexicana de Fitopatología* 28: 44-57.
- Restrepo, J. y Aristizábal, I. 2010. Conservación de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch cv. camarosa) mediante la aplicación de recubrimientos comestibles de gel mucilaginoso de penca sábila (*Aloe barbadensis* Miller) y cera de carnauba. *VITAE, revista de la facultad de química farmacéutica de la Universidad de Antioquía* 17(3): 252-263.
- Restrepo, A.; Cortés, M. y Rojano, B. 2009. Determinación de la vida útil de fresa (*Fragaria ananassa* duch.) fortificada con vitamina E. *Revista de Ingeniería Dyna* 76(159): 163-175.

- Ribeiro, C.; Vicente, A.; Teixeira, J. y Miranda, C. 2007. Optimization of edible coating composition to retard strawberry fruit senescence. *Postharvest Biology and Technology* 44: 63–70.
- Rodríguez, M. y Mora, R. 2001. *Estadística Informática: Casos y Ejemplos con el SPSS*. 1ra ed. Universidad de Alicante. 310 p.
- Rojas, H. 1991. Determinación de los parámetros para la obtención de goma de semilla de tara (*Caesalpinia tinctoria*) por vía acuosa y secado por rociada (Spray Dry). Tesis M. Sc. Lima, PE, UNALM. 94 p.
- Saavedra, N. y Algecira, N. 2010. Evaluación de películas comestibles de almidón de yuca y proteína aislada de soya en la conservación de fresas. *NOVA – Publicación Científica en Ciencias Biomédicas* 8(14): 121-240.
- Siccha, M. y Lock de Ugaz, O. 1994. Comportamiento reológico y peso molecular de hidrocoloides de tres especies de caesalpinias peruanas. *Boletín de la Sociedad Química del Perú* 60(1): 31-38.
- Sonti, S. 2003. Consumer perception and application of edible coating on fresh-cut fruits and vegetables. Tesis M. Sc. Telangana, IN. Osmania University College of Technology. 133 p.
- Stat-Ease, Inc. 2006. User guide (spiral bound) to Design-Expert® Version 7 Software. Chapter: Mixture Design Tutorial (Part 1 – The Basics). Consultado 13 oct. 2014. Disponible en: <http://statease.info/dx70files/manual/DX7%20Contents%20Printed.pdf>
- StatPoint Technologies Inc. 2006. Diseño de experimentos – Diseño de Mezclas. Rev. 9/14/2006. Consultado 15 Ago. 2014. Disponible en: <http://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2011/12/tutoriales/DDE%20-%20Disenos%20de%20Mezclas.pdf>.
- Trejo, M.; Ramos, K. y Pérez, C. 2007. Efecto de la aplicación de un recubrimiento comestible a base de gelatina sobre la calidad de fresa (*Fragaria vesca* L.) almacenada en refrigeración. V Congreso Iberoamericano de Tecnología Postcosecha y Agroexportaciones. España. Consultado 26 ago. 2015. Disponible en: www.horticom.com/pd/imagenes/68/180/68180.pdf.
- UCDAVIS (University of California, Davis). 1997. Post harvest chlorination: Basic properties and key points for effective disinfection (en línea). Publication 8003. Consultado 04 jul. 2014. Disponible en: <http://ucfoodsafety.ucdavis.edu/files/26414.pdf>.
- Vargas, M.; Albors, A.; Chiralt, A. y González, C. 2006. Quality of cold-stored strawberries as affected by chitosan–oleic acid edible coatings. *Postharvest Biology and Technology* 41: 164–171.

- Vargas, M.; Pastor, C.; Chiralt, A.; McClements, J. y González, Ch. 2008. Recent Advances in Edible Coatings for Fresh and Minimally Processed Fruits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 48: 496-511.
- Villanueva, C. 2007. *La Tara – El oro verde de los Incas*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Resultados del análisis de regresión para la pérdida de peso

Tabla 22: Análisis de variancia (ANVA) de la ecuación de regresión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	<i>p-value</i> Prob > F
Modelo	155,65	5	31,13	21,69	<0.0001
Error Experimental	14,35	10	1,44		
<i>Falta de ajuste</i>	10,01	5	2,00	2,31	0,192
<i>Error Puro</i>	4,34	5	0,87		
Total	170,00	15			

Media = 16,00, Desviación Estándar = 1,20, $R^2 = 0,9156$, $R^2_{adj} = 0,8734$

Tabla 23: Prueba de significancia para los términos del modelo de regresión.

Términos del Modelo	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	<i>p-value</i> Prob > F
Lineales	81,95	2	40,98	28,55	<0.0001
X_1X_2	3,70	1	3,70	2,58	0.1395
X_1X_3	2,10	1	2,10	1,46	0.2546
X_2X_3	47,26	1	47,26	32,93	0.0002
Error	14,34	10	1,44		

ANEXO 2: Resultados del análisis de regresión para la firmeza

Tabla 24: Análisis de variancia (ANVA) de la ecuación de regresión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	<i>p-value</i> Prob > F
Modelo	20937,55	5	4187,51	8,06	0,0028
Error Experimental	5197,37	10	519,74		
<i>Falta de ajuste</i>	3992,83	5	798,57	3,31	0,1072
<i>Error Puro</i>	1204,53	5	240,91		
Total	26134,91	15			

Media = 462.57, Desviación Estándar = 22,80, $R^2 = 0.8011$, $R^2_{adj} = 0.7017$

Tabla 25: Prueba de significancia para los términos del modelo de regresión.

Términos del Modelo	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	<i>p-value</i> Prob > F
Lineales	11676,04	2	5838,02	11,23	0,0028
X_1X_2	879,23	1	879,23	1,69	0,2226
X_1X_3	276,53	1	276,53	0,53	0,4825
X_2X_3	6953,83	1	6953,83	13,38	0,0044
Error	5197,37	10	519,74		

ANEXO 3: Resultados del análisis de regresión para la tasa respiratoria

Tabla 26: Análisis de variancia (ANVA) de la ecuación de regresión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	<i>p-value</i> Prob > F
Modelo	53,50	5	10,70	28,17	<0,0001
Error Experimental	3,80	10	0,38		
<i>Falta de ajuste</i>	1,29	5	0,26	0,51	0,7582
<i>Error Puro</i>	2,51	5	0,50		
Total	57,30	15			

Media = 46,41, Desviación Estándar = 0,62, $R^2 = 0,9337$, $R^2_{adj} = 0,9006$

Tabla 27: Prueba de significancia para los términos del modelo de regresión de la tasa respiratoria.

Términos del Modelo	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	<i>p-value</i> Prob > F
Lineales	11,11	2	5,56	14,63	0,0011
X_1X_2	0,33	1	0,33	0,87	0,3723
X_1X_3	1,61	1	1,61	4,23	0,0668
X_2X_3	1,79	1	1,79	4,71	0,0551
Error	3,80	10	0,38		

ANEXO 4: Resultados del análisis de regresión para la luminosidad

Tabla 28: Análisis de variancia (ANVA) de la ecuación de regresión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	<i>p-value</i> Prob > F
Modelo	31,84	5	6,37	11,98	0,0006
Error Experimental	5,32	10	0,53		
<i>Falta de ajuste</i>	1,13	5	0,23	0,27	0,9113
<i>Error Puro</i>	4,19	5	0,84		
Total	37,15	15			

Media = 29,00, Desviación Estándar = 0,73, $R^2 = 0,8569$, $R^2_{adj} = 0,7854$

Tabla 29: Prueba de significancia para los términos del modelo de regresión.

Términos del Modelo	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Valor F	<i>p-value</i> Prob > F
Lineales	22,13	2	11,06	20,81	0,0003
X_1X_2	0,50	1	0,50	0,94	0,3556
X_1X_3	7,80	1	7,80	14,68	0,0033
X_2X_3	1,17	1	1,17	2,21	0,1680
Error	5,32	10	0,53		

ANEXO 5: Análisis de la pérdida de peso de las fresas cv. Aromas sin y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.

Tabla 30: Pérdida de peso (%) de fresas cv. Aromas sin recubrimiento y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.

Tratamiento	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8	Día 9
Control	0	6,34 ± 0,22 _{av}	9,48 ± 0,42 _{aw}	13,02 ± 0,10 _{ax}	15,34 ± 0,02 _{ay}	16,04 ± 0,13 _{az}
Recubrimiento óptimo	0	3,92 ± 0,25 _{bv}	5,66 ± 0,12 _{bw}	8,53 ± 0,24 _{bx}	10,68 ± 0,03 _{by}	12,39 ± 0,00 _{bz}

Valores promedios y desviación estándar. El nivel de significación estadística se determinó al 95 % de probabilidad con la prueba LSD. Letras diferentes (a y b) dentro de una columna indican diferencias significativas entre los tratamientos. Letras diferentes (v,w,x,y,z) dentro de una fila indican diferencias significativas entre días para un mismo tratamiento.

Tabla 31: Análisis de Varianza para determinar el efecto significativo de los tratamientos y días de almacenamiento, sobre la pérdida de peso.

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Tratamiento	142.637	1	142.637	646.71	0.0000
B:Bloque (días)	459.193	4	114.798	520.49	0.0000
RESIDUOS	7.49893	34	0.220557		
TOTAL (CORREGIDO)	609.329	39			

Puesto que 2 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre pérdida de peso con un 95 % de nivel de confianza.

ANEXO 6: Análisis de la firmeza de las fresas cv. Aromas sin y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.

Tabla 32: Firmeza (gf) de fresas cv. Aromas sin recubrimiento y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.

Tratamiento	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8	Día 9
Control	613,71 ± 0,49 _{au}	579,71 ± 0,49 _{bv}	549,57 ± 1,27 _{bw}	530,29 ± 0,76 _{bx}	501,57 ± 1,27 _{by}	486,57 ± 0,53 _{bz}
Recubrimiento óptimo	612,29 ± 0,95 _{au}	590 ± 0,58 _{av}	569,29 ± 0,76 _{aw}	549,04 ± 0,82 _{ax}	521,14 ± 1,21 _{ay}	500,57 ± 0,53 _{az}

Valores promedios y desviación estándar. El nivel de significación estadística se determinó al 95 % de probabilidad con la prueba LSD. Letras diferentes (a y b) dentro de una columna indican diferencias significativas entre los tratamientos. Letras diferentes (u,v,w,x,y,z) dentro de una fila indican diferencias significativas entre días para un mismo tratamiento.

Tabla 33: Análisis de Varianza para determinar el efecto significativo de los tratamientos y días de almacenamiento, sobre la firmeza del fruto en almacenamiento.

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Tratamiento	3817.81	1	3817.81	238.83	0.0000
B:Bloque (Días)	140793.	5	28158.5	1761.49	0.0000
RESIDUOS	1230.89	77	15.9856		
TOTAL (CORREGIDO)	145841.	83			

Puesto que 2 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre pérdida de peso con un 95 % de nivel de confianza.

ANEXO 7: Análisis de la Tasa Respiratoria de las fresas cv. Aromas sin y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.

Tabla 34: Tasa Respiratoria (mgCO₂.kg⁻¹.h⁻¹) de fresas cv. Aromas sin recubrimiento y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.

Tratamiento	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8	Día 9
Control	23,54 ± 0,35 _{au}	25,45 ± 0,17 _{av}	37,02 ± 0,49 _{aw}	41,18 ± 0,21 _{ax}	45,49 ± 0,17 _{ay}	48,76 ± 0,03 _{az}
Recubrimiento óptimo	22,09 ± 0,65 _{bu}	23,64 ± 0,22 _{bv}	30,76 ± 0,21 _{bw}	34,49 ± 0,22 _{bx}	39,57 ± 0,17 _{by}	45,82 ± 0,06 _{bz}

Valores promedios y desviación estándar. El nivel de significación estadística se determinó al 95 % de probabilidad con la prueba LSD. Letras diferentes (a y b) dentro de una columna indican diferencias significativas entre los tratamientos. Letras diferentes (u,v,w,x,y,z) dentro de una fila indican diferencias significativas entre días para un mismo tratamiento.

Tabla 35: Análisis de Varianza para determinar el efecto significativo de los tratamientos y días de almacenamiento, sobre la tasa respiratoria del fruto en almacenamiento.

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Tratamiento	157.051	1	157.051	102.38	0.0000
B:BLOQUE	2846.79	5	569.359	371.14	0.0000
RESIDUOS	44.4878	29	1.53406		
TOTAL (CORREGIDO)	3048.33	35			

Puesto que 2 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre pérdida de peso con un 95 % de nivel de confianza.

ANEXO 8: Análisis de la Luminosidad de las fresas cv. Aromas sin y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C

Tabla 36: Luminosidad (s.u.) de fresas cv. Aromas sin recubrimiento y con recubrimiento óptimo durante su almacenamiento a 5 °C.

Tratamiento	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8	Día 9
Control	28,82 ± 0,32 _{au}	28,52 ± 0,25 _{av}	28,15 ± 0,13 _{aw}	26,67 ± 0,19 _{ax}	26,32 ± 0,08 _{ay}	26,17 ± 0,01 _{ay}
Recubrimiento óptimo	31,86 ± 0,07 _{bu}	31,85 ± 0,12 _{bu}	31,47 ± 0,11 _{bv}	31,05 ± 0,16 _{bx}	30,95 ± 0,06 _{bx}	30,97 ± 0,00 _{bx}

Valores promedios y desviación estándar. El nivel de significación estadística se determinó al 95 % de probabilidad con la prueba LSD. Letras diferentes (a y b) dentro de una columna indican diferencias significativas entre los tratamientos. Letras diferentes (u,v,w,x,y,z) dentro de una fila indican diferencias significativas entre días para un mismo tratamiento.

Tabla 37: Análisis de Varianza para determinar el efecto significativo de los tratamientos y días de almacenamiento, sobre la luminosidad del fruto en almacenamiento.

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Factor_A	276.125	1	276.125	1745.99	0.0000
B:Bloque (días)	38.7834	5	7.75667	49.05	0.0000
RESIDUOS	10.2796	65	0.158148		
TOTAL (CORREGIDO)	325.188	71			

Puesto que 2 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre pérdida de peso con un 95 % de nivel de confianza.

ANEXO 9: Análisis Microbiológico

Tabla 38: Conteo de mohos en fresa con recubrimiento óptimo y fresa sin recubrir

Tiempo de Almacenamiento (Días)	Fresa con Recubrimiento óptimo	Fresa sin recubrimiento
	Mohos UFC/g	Mohos UFC/g
0	<10	<10
2	60	$1,2 \times 10^2$
4	$2,2 \times 10^2$	$3,8 \times 10^2$
6	$5,9 \times 10^2$	$7,6 \times 10^2$
8	$8,2 \times 10^2$	$1,1 \times 10^3$
9	$1,6 \times 10^3$	$1,3 \times 10^4$