

**Caracterización de bioplástico de almidón
elaborado por el método de casting reforzado
con albedo de maracuyá (*Passiflora edulis*
spp.)**

Jimmy Alcides Chariguamán Chanatasig

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2015

ZAMORANO
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

**Caracterización de bioplástico de almidón
elaborado por el método de casting reforzado
con albedo de maracuyá (*Passiflora edulis*
spp.)**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Agroindustria Alimentaria en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Jimmy Alcides Chariguamán Chanatasig

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2015

Caracterización de bioplástico de almidón elaborado por el método de casting reforzado con albedo de maracuyá (*Passiflora edulis* spp.)

Presentado por:

Jimmy Alcides Chariguamán Chanatasig

Aprobado:

Juan Ruano, D.Sc.
Asesor Principal

Luis Fernando Osorio, Ph.D.
Director
Departamento de Agroindustria
Alimentaria

Jorge Cardona, Ph.D.
Asesor

Raúl H. Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

Caracterización de bioplástico de almidón elaborado por el método de casting reforzado con albedo de maracuyá (*Passiflora edulis* spp.)

Jimmy Alcides Chariguamán Chanatasig

Resumen. Los bioplásticos son polímeros de alto peso molecular de origen natural proveniente de fuentes renovables como los hidrocoloides con carácter biodegradable. Son considerados una solución para disminuir la contaminación al medio ambiente por plásticos derivados de petróleo; pero sólo el uso de almidones no brinda las características físicas que las industrias demandan. Esto ha impulsado a la búsqueda de compósitos a base de fibra para mejorar las propiedades del bioplástico. Esta investigación se plasmó con el fin de elaborar un bioplástico reforzado con fibra de maracuyá, aplicando el método de casting y evaluar su efecto en las propiedades físicas y su tiempo de degradación. Se utilizó la metodología superficie respuesta definiendo como variables independientes la concentración de harina de albedo de maracuyá, glicerol y proporción de almidones de maíz con respecto al de yuca. Las variables dependientes o respuesta evaluadas fueron: espesura, propiedades de barrera, propiedades ópticas y propiedades mecánicas. Para las unidades experimentales se establecieron: ocho puntos factoriales, seis puntos axiales y seis repeticiones del punto central. La adición de harina de maracuyá presentó un efecto positivo en las propiedades ópticas, propiedades mecánicas y afecto a las propiedades de barrera. Se obtuvieron siete regresiones matemáticas con carácter predictivo y dos de carácter tendencioso. Con una combinación de 2.83% de harina de maracuyá, 49.5% de glicerol y una relación de 50:50 de almidón de maíz/yuca se logra optimizar las variables físicas del bioplásticos.

Palabras clave: Compósito biodegradable, coproducto, manejo de desechos, propiedades de barrera.

Abstract: Bioplastics are high molecular weight polymers of natural origin from renewable sources such as hydrocolloids with biodegradable characteristics. They are considered a solution to reduce environmental pollution by plastics derived from petroleum; but starch itself do not provide the physical characteristics that industries demand. This has prompted the search for fiber-based composites to enhance the properties of bioplastics. This research was developed in order to produce a fiber-reinforced bioplastic of passion, applying the method of casting and assess their effect on the physical properties and degradation time. Response surface methodology was used defining as independent variables the concentration of passion fruit albedo flour, glycerol and corn starch ratio with respect to cassava. The dependent variables or response evaluated were: thickness, barrier properties, optical properties and mechanical properties. The experimental units established were: 8 factorial points, 6 axial points and 6 repetitions of the central point. The addition of flour passion present a positive effect on the optical properties, mechanical properties and affected the barrier properties. Seven math regressions were obtained with predictive character and two of tendentiousness. With a combination of 2.83% passion fruit flour, 49.5% glycerol and 50:50 ratio corn starch / cassava is achieved optimization physical variables of bioplastics.

Key words: Barrier properties, co-product, biodegradable composer waste management

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iii
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
4. CONCLUSIONES	51
5. RECOMENDACIONES	52
6. LITERATURA CITADA	53
7. ANEXOS	58

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Equipo utilizado para la elaboración de bioplástico.....	3
2. Niveles codificados de las variables del experimento.....	6
3. Composición del diseño experimental.....	6
4. Composición de la harina de albedo de maracuyá.	11
5. Distribución granulométrica de la harina de albedo de maracuyá.	12
6. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en la espesura del bioplástico.	14
7. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en la Permeabilidad al vapor de agua.....	15
8. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en la permeabilidad al agua (Pva) del bioplástico.	16
9. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en la solubilidad en agua a (25±2 C°).	18
10. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en solubilidad en agua % de un bioplástico.	19
11. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en el diferencial de color.	22
12. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en el diferencial de color de un bioplástico.	23
13. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en opacidad.....	26
14. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la opacidad de un bioplástico.	27
15. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en la fuerza de perforación.	29
16. Coeficientes de regresión y probabilidad (p) de un modelo de regresión polinomial aplicada en la fuerza de perforación de un bioplástico.	30
17. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en deformación por perforación.	33
18. Coeficientes de regresión y probabilidad (p) de un modelo de regresión polinomial aplicada en deformación por perforación de un bioplástico.	34
19. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de maracuyá en la tensión de los tratamientos.	37
20. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en tensión de un bioplástico.	38

Cuadro	Página
21. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de maracuyá en la deformación por elongación del bioplástico.	40
22. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en deformación por tensión de un bioplástico.	41
23. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en el módulo de elasticidad.	44
24. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada al módulo de elasticidad de un bioplástico.	45
25. Caracterización del suelo utilizado para el análisis de degradación del bioplástico. ...	47
26. Datos climáticos de Zamorano, Francisco Morazán.	47
27. Cuantificación del área no degradada del bioplástico de harina de maracuyá.	48
28. Muestra de la apariencia de las películas degradadas a base de harina de albedo de maracuyá en condiciones ambientales.	49

Figuras	Página
1. Porcentaje de retención acumulado de las partículas de harina de albedo de maracuyá en cada tamiz.	12
2. Efecto de las variables independientes; porcentaje de glicerol y harina de albedo de maracuyá, en la permeabilidad al vapor de agua del bioplástico.	17
3. Efecto de las variables independientes; relación almidón de maíz/yuca y porcentaje de glicerol, en solubilidad en agua del bioplástico.	20
4. Efecto de las variables independientes; relación almidón de maíz/yuca y porcentaje de glicerol, en solubilidad en agua del bioplástico.	21
5. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de maracuyá y relación almidón de maíz/yuca, en solubilidad en agua del bioplástico.	21
6. Superficie respuesta de los efectos de las variables independientes sobre la diferencia de color del bioplástico.	24
7. Superficie respuesta de los efectos de las variables independientes sobre la diferencia de color del bioplástico.	24
8. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y porcentaje de glicerol, en opacidad del bioplástico.	28
9. Efecto de las variables independientes; porcentaje de glicerol y relación M/Y, en la fuerza de perforación (N) de las películas.	31
10. Efecto de las variables independientes; harina de maracuyá y relación M/Y, en la fuerza de perforación (N) de las películas.	31
11. Efecto de las variables independientes; harina de maracuyá y glicerol, en la fuerza de perforación (N) de las películas.	32
12. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y porcentaje de glicerol, en deformación por perforación (%) de las películas.	35

Cuadro	Página
13. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y porcentaje de glicerol, en deformación por perforación (%) de las películas.....	35
14. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y % de glicerol, en la tensión MPa del bioplástico.....	39
15. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y relación almidón de maíz-yuca, en deformación por tensión % del bioplástico.....	42
16. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y relación almidón de maíz-yuca, en deformación por tensión % del bioplástico.....	42
17. Efecto de las variables independientes; % de glicerol y relación almidón de maíz-yuca, en módulo de elasticidad MPa del bioplástico.....	46
18. Valores óptimos de las variables independientes sobre las propiedades físicas y de barrera de un bioplástico de harina de albedo de maracuyá.....	50

Anexos	Página
1. Flujograma de obtención de harina de albedo de maracuyá.....	58
2. Representación gráfica de la región experimental.....	58
3. Fotos del primer análisis de degradación a los 15 días	59
4. Prototipo de bolsa del bioplásticos	59
5. Prototipo de sobre de café instantáneo del bioplástico.....	60
6. Evaluación de la solución filmogénica como recubrimiento en rodajas de plátano al día tres en condiciones ambientales.....	60

1. INTRODUCCIÓN

Los bioplásticos, son compuestos de alto peso molecular de origen natural provenientes de fuentes renovables como hidrocoloides y con carácter biodegradable. Estos son considerados como una solución para disminuir la contaminación al medio ambiente por los plásticos fabricados por polimerización de compuestos derivados de petróleo (Baos, sf).

Los bioplásticos se pueden elaborar a partir de cultivos de poliésteres microbianos o de almidón, celulosa (Merchán y Ballesteros, 2009). Pero la base de la elaboración del bioplástico se ha centralizado en el uso del almidón como materia prima, debido a su alta disponibilidad, bajo costo, renovable, biodegradable y a que es económicamente competitivo con el petróleo (Andler y Díaz, 2013).

El almidón es el carbohidrato más abundante después de la celulosa (Bayer y Lamed, 1992), en su estado nativo está compuesto por gránulos cristalinos insolubles en agua. Está compuesto por un polímero lineal (amilosa), un polímero ramificado (amilopectina) y están unidos entre sí por enlaces de hidrógenos. La aplicación de almidón en la fabricación de bioplásticos se basa en propiedades químicas, físicas y funcionales de la amilosa para formar geles y su capacidad para formar películas (Young, 1984).

Las moléculas de amilosa forman enlaces de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de polímeros adyacentes; como resultado, la afinidad del polímero por el agua se reduce, lo que favorece la formación de pastas opacas y películas resistentes (Würzburg, 1986). Las películas de compuestos de almidón son muy frágiles, lo que crea la necesidad de añadir plastificantes compatibles con los polisacáridos, estos compuestos ayudan a mejorar la flexibilidad de las películas (Mali *et al.*, 2004).

Los plastificantes generalmente son líquidos, inodoros, incoloros y de baja volatilidad que al añadir a otro material cambia sus propiedades físicas, mecánicas y suavizan el polímero por debajo de su transición vítrea para reducir su cristalinidad o punto de fusión (Sperling, 2006). Según (Mchugh, Krocha, 1994) los plastificantes tales como el glicerol y el sorbitol reducen los enlaces de hidrógeno internos y al mismo tiempo aumentan los espacios intermoleculares evitando las grietas en los bioplásticos durante la manipulación y almacenamiento (Gontard *et al.*, 1993).

De acuerdo con (Mali *et al.*, 2004) los plastificantes aumentan la permeabilidad al vapor de agua y su higroscopicidad en películas laminadas, ya que la mayoría de los plastificantes utilizados en las películas de almidón tienen carácter hidrófilo y también brinda al producto final características elásticas permitiendo su maleabilidad (Meneses *et al.*, 2007).

El uso solo de almidones de cereal y tubérculos, produce bioplásticos frágiles y no cumplen con las características reológicas que el mercado demanda. La incorporación de fibras u otros materiales a la matriz del bioplástico puede ser la solución para aumentar las características reológicas del mismo (Alves, 2013).

Los residuos del procesamiento de la industria de maracuyá, se pueden utilizar como agentes de refuerzo en las películas de almidón ya que tienen altos contenidos de fibra que ayudan a mejorar las características reológicas del bioplástico, estabilidad térmica, a disminuir la absorción de humedad y a evitar la recristalización del almidón por la interacción entre la fibra y el almidón termoplástico (Kaewtatip y Thongmee, 2012).

En un compuesto la concentración de fibras generalmente varía de 5% a 30% en peso del total del termoplástico. Al incorporar fibras vegetales a la matriz termoplástica de almidón se forma un material compuesto o biocompuesto. Debido a que todos los componentes son de origen biológico o natural, se le considera totalmente biodegradable (Fowler *et al.*, 2006).

Un compuesto es cualquier material constituido por más de un componente que tienen diferentes propiedades que no son posibles de obtener de los componentes puros de la misma. El objetivo de hacer un compuesto es lograr un material que tenga las propiedades de los componentes que lo conforman (Palazuelos *et al.*, 2006).

En la actualidad se están realizando estudios sobre compuesto de almidón, glicerol y fibra donde el contenido de fibra como el glicerol afecta la apariencia final del producto. Donde un incremento en el contenido de glicerol mejora las propiedades del producto en términos de flexibilidad y un incremento en el contenido de fibra resulta en un producto más rígido (Guan *et al.*, 2004).

En esta investigación se busca evaluar y caracterizar el efecto de las diferentes propiedades del plastificante, almidones y el uso de fibra de maracuyá, sobre las propiedades de barrera, mecánicas de un bioplástico, planteándose los siguientes objetivos.

- Determinar cuáles son las concentraciones de almidón, harina de albedo de maracuyá y plastificante que brinden las mejores propiedades reológicas.
- Desarrollar regresiones matemáticas para la optimización de las variables en las propiedades físicas y de barreras del bioplástico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio. El estudio se realizó en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, departamento de Francisco Morazán Honduras. El bioplástico se elaboró en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ).

Materia prima. Para llevar a cabo el estudio se utilizó almidón de yuca (AY) *Manihot sculenta* y almidón de maíz (AM) *Zea mays* adquirido en el supermercado “Más × menos”. La glicerina fue adquirida por la empresa JG Scientific. Ambos proveedores localizados en la ciudad de Tegucigalpa, Honduras. El albedo de maracuyá *Passiflora edulis* spp. Se adquirió de los desechos generados en el proceso de despulpado de la planta Hortofrutícola de Zamorano.

En el Cuadro 1 se describen los equipos utilizados para la elaboración del bioplástico biodegradable de harina de maracuyá, glicerol y relación de almidones de maíz con respecto al almidón de yuca.

Cuadro 1. Equipo utilizado para la elaboración de bioplástico.

Equipo	Marca/ Modelo
Estufa agitador	Barnstead Thermolyne SP131325
Texturómetro	BROOKFIELD CT3 4500
Color	ColorFlex Hunterlab 45/0
Opacidad	Spectronic Genesys 5 336001
Cámara de estabilidad	NORLAKE Scientific
Balanza analítica	OHAUS ADVENTURER AX224/E
Molino	Cyclotec 1093
Molino	Arthur H. Thomas 32F770
Horno	Fisher 750f
Horno	NAPCO 630

Elaboración de la harina de albedo de maracuyá. Se siguió el flujograma establecido por Alves (2013). Donde las maracuyás fueron seleccionadas y lavadas en agua manualmente. En el proceso de sanitización se usó una solución clorada de 100 ppm durante 10 a 15 minutos, se procedió con el despulpado, posteriormente se secó en un horno a 60°C por 24 horas y se molió en un molino de martillo.

Elaboración del bioplástico. Se realizaron pruebas preliminares para determinar el flujo de proceso y las cantidades de almidón (AM y AY), glicerol, harina de albedo de maracuyá y agua eran adecuadas para llevar a cabo la elaboración del bioplástico. Se utilizó la metodología de casting para la elaboración de las soluciones filmogénicas (SF) y adicionalmente se mezcló en una bolsa por 45 segundos el AM, AY y la harina de albedo de maracuyá para lograr una mejor homogeneidad. Se mezcló el 75% del agua con el glicerol, con agitación magnética constante y se calentó hasta 50 °C. Adicionalmente se agregó la mezcla de los almidones y la harina de maracuyá con el otro 25% del agua para evitar la formación de grumos calentándose hasta 70 ± 2 °C durante 10 minutos. Posteriormente se enfrió la solución a 50 °C.

Secado y acondicionamiento de filmes. Después del enfriamiento se vertieron 30 ± 2 g SF, en platos de plástico de 162 cm^2 de área. Para el secado se utilizó una cámara de estabilidad a una temperatura de $40 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ durante 24 h. Luego del secado de las películas se separaron de los platos de plástico manualmente y se almacenaron en un desecador previo a ser analizadas a 25 °C con 75% de humedad relativa controlada, la cual se obtuvo con una solución saturada de Cloruro de Sodio (NaCl) (Soto, Candelas sf) y Muñoz (2014) determinaron por un isoterma que el bioplástico entra en equilibrio al sexto día en las condiciones mencionadas.

Diseño experimental. Para la evaluación de las variables independientes, harina de albedo de maracuyá, % de glicerol y proporción de almidón de maíz y yuca, se utilizó una metodología experimental de diseño de superficie respuesta central compuesto de tercer orden con una probabilidad de significancia del 10% (Box *et al.*, 1978). Los parámetros del proceso fueron codificados (-1,0, 1) y se calcularon de acuerdo a la ecuación 1.

$$X_i = \left(\frac{X_i \times Z}{\Delta x_i} \right) \quad [1]$$

Dónde:

x_i = Valor codificado de la variable x_i

X_i = El valor real de la variable

Z = Valor real de la variable en el punto central

Δx_i = Intervalo de la variable x_i

Este modelo presenta dos niveles de variable axiales, que son codificados como $+\alpha$ y $-\alpha$. El valor alfa depende del número factorial ($F=2^k$) del diseño y del número de variables independiente ($K=3$), en el caso de este experimento se define por la ecuación 2.

$$\pm\alpha = (F)^{1/4} = (2^k)^{1/4} = (2^3)^{1/4} = 1.682 \quad [2]$$

El número de tratamientos del experimento se basó en un diseño factorial completo, ecuación 3.

$$n = 2^k + 2k + m \quad [3]$$

Dónde:

2^k = Número de puntos factoriales

$2K$ = Número de puntos axiales

m = Número de repeticiones del punto central

Los tratamientos se distribuyeron de la siguiente forma:

$2^k = 2^3 = 8$ puntos factoriales.

$2k = 2 \times 3 = 6$ puntos axiales.

$m = 6$ repeticiones del punto central.

Total = 20 unidades experimentales

Control. Para éste estudio se tomó el punto axial negativo como control ya que representa el valor mínimo de la harina de albedo de maracuyá de este estudio.

La amplitud en el rango de las variables se determinó en base a las pruebas preliminares y en literatura consultada. El punto central se determinó en base a resultados reportados por (Alves, 2013) para la harina de maracuyá, el glicerol y la relación de almidones se tomó del punto central del estudio de (Muñoz, 2014). Para el análisis de los resultados del estudio, el método describe el comportamiento de la combinación de las variables independientes (X^k), la variable dependiente o la respuesta (Y_i). La respuesta fue en función de los niveles en donde las variables independientes fueron combinadas. Definidas por (Box y Draper, 1967) con la ecuación 4.

$$Y_i = F(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad [4]$$

Cada respuesta se ajustó a través de un análisis de regresión lineal con un polinomio cuadrático con las variables (X_k) para cada respuesta (Y). El término general que se utilizó para predecir el comportamiento de cada respuesta se describe con la ecuación 5.

$$Y_i = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + B_{12}X_1X_2 + \varepsilon \quad [5]$$

Dónde:

Y_i = Función respuesta;

X_1, X_2 = Valores de las variables independientes;

B_0 = Coeficiente relativo a la interpretación del plan con la respuesta en el eje;

B_1, B_2, B_3 = Coeficientes lineales estimados por el mínimo cuadrado;

B_{11}, B_{22}, B_{33} = Coeficientes de variables cuadráticas;

B_{12}, B_{13}, B_{22} = Coeficiente de interacción entre las variables independientes;

ε = Error experimental.

En el cuadro 2 se presentan los niveles codificados (-1, 0,+1) y los valores axiales (- α y + α) de las variables independientes del experimento.

Cuadro 2. Niveles codificados de las variables del experimento.

	Niveles				
	- α	-1	0	1	+ α
% Harina de maracuyá	0.00	1.20	3.00	4.20	5.00
% Glicerol	41.60	45.00	50.00	55.00	58.40
% Relación Almidón de maíz/yuca	7.90	25.00	50.00	75.00	92.10

En el Cuadro 3 se describen los valores reales y codificados del diseño experimental completo con tres variables independientes y cinco niveles de variación. Las variables dependientes fueron: espesor, permeabilidad al vapor de agua (Pva), solubilidad en agua, color, opacidad, degradación, elongación y perforación.

Cuadro 3. Composición del diseño experimental.

Tratamientos	Niveles Codificados			Niveles reales de variables		
	Harina de maracuyá	Glicerol %	Relación Almidón de maíz/yuca	Harina de maracuyá	Glicerol %	Relación Almidón de maíz/yuca
1	-1	-1	-1	1.20	45.00	25.00
2	1	-1	-1	4.20	45.00	25.00
3	-1	1	-1	1.20	55.00	25.00
4	1	1	-1	4.20	55.00	25.00
5	-1	-1	1	1.20	45.00	75.00
6	1	-1	1	4.20	45.00	75.00
7	-1	1	1	1.20	55.00	75.00
8	1	1	1	4.20	55.00	75.00
9 (b)	-1.682	0	0	0.00	45.00	50.00
10	1.682	0	0	5.00	45.00	50.00
11	0	-1.682	0	3.00	41.60	50.00
12	0	1.682	0	3.00	58.40	50.00
13	0	0	-1.682	3.00	50.00	7.90
14	0	0	1.682	3.00	50.00	92.10
15©	0	0	0	3.00	50.00	50.00
16©	0	0	0	3.00	50.00	50.00
17©	0	0	0	3.00	50.00	50.00
18©	0	0	0	3.00	50.00	50.00
19©	0	0	0	3.00	50.00	50.00
20©	0	0	0	3.00	50.00	50.00

©: Punto central del experimento.

(b): Control

Análisis estadístico. Se realizó una separación de medias por LSmeans y un análisis de varianza ANDEVA con un nivel de $P < 0.05$, también se utilizó un programa “Statistical Analysis System” (SAS Versión 9.3®).

Para analizar las variables independientes codificadas se utilizó el programa Statistica versión 7.0. Para obtener los coeficientes de regresión y los valores para la elaboración de gráficos superficie respuesta. Para la interpretación de los datos y que el modelo sea denominado predictivo se utilizó un R^2 mayor a 0.6 y los modelos que presenten un R^2 menor a 0.6 será considerado tendenciosos (Thompson, 1982) (Rocha, 2009).

Se realizó un análisis de prueba de varianza (ANOVA) empleando un F 5% de nivel de significancia, por lo que un modelo de regresión es significativo cuando el valor F calculado es mayor o igual que el F tabular, mientras mayor sea el F calculado el modelo más predictivo será.

Caracterización de la harina de albedo de maracuyá.

Humedad. El contenido de humedad se determinó a partir del método gravimétrico por AOAC 934,01, (2005). Éste evalúa la pérdida de peso de la muestra a 105 °C por 24 horas hasta peso constante, lo que caracteriza que toda la humedad de la muestra fue volatilizada. Se calculó según la ecuación 6.

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad [6]$$

Dónde:

m1: Peso del crisol.

m2: Peso del crisol más la muestra húmeda

m3: Peso del crisol más la muestra seca.

Granulometría. El tamaño de partícula se evaluó mediante la clasificación por tamaño de partículas donde se agito manualmente durante cinco minutos. Se utilizó un conjunto de cinco tamices (STANDARD TESTING SIEVE) con aberturas de malla: 14, 40, 60, 80 y 200 de malla equivalente a: 1410, 425, 250, 180 y 75 micras y de fondo. Los tamices fueron pesados y se tomó de éstos el valor sustraído. El resultado retenido fue equivalente en cada abertura de los tamices. De acuerdo a la metodología descrita por Germani *et al.*, (1997).

Índice de solubilidad en agua (ISA) e Índice de absorción de agua (IAA). Esta técnica se realizó de acuerdo a Anderson *et al.*, (1969) modificada. Los análisis se realizaron por cuadruplicado.

Cerca de 1 g de muestra en base húmeda, fue pesado en tubos de centrifugación, previamente tarados. Luego, se adicionó 10 ml de agua destilada. Después de adicionar el agua destilada a los tubos estos fueron agitados mecánicamente por medio de un agitador de tubos tipo Vortex para garantizar la homogeneidad de la muestra. Luego se sometió a

baño maría a una temperatura de 30 °C con una charola de agitación constante a 200 rpm durante 30 minutos.

Luego los tubos se sometieron a centrifugación durante 15 minutos a 6000 rpm. El gel sedimentado, se separó por decantación, vaciando el sobrenadante en un plato petril de vidrio previamente puesto a peso constante. Se registró el peso del tubo con el gel. El sobrenadante se evaporó durante 4 h a 105 °C en un horno (Torres, 2007). Los platos se dejaron enfriar por media hora en un desecador y se pesaron para obtener el peso de los sólidos solubles y así obtener el valor del ISA con la siguiente ecuación.

$$\text{ISA (\%)} = \frac{\text{Peso el residuo de evaporación (g)}}{\text{Peso seco de la muestra (g)}} \times 100 \quad [7]$$

El índice de absorción de agua (IAA), se expresa como una relación entre el peso del residuo (después del peso seco de la muestra), al cual se le resta el peso del residuo de la evaporación del sobrenadante, como se observa en la siguiente ecuación.

$$\text{IAA} = \frac{\text{Peso del residuo de centrifugación (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \quad [8]$$

Caracterización del Bioplástico

Espesura. La espesura del bioplástico fue determinada utilizando un micrómetro manual con una sensibilidad de (± 0.01 mm) marca Startter en cinco puntos aleatorios. La espesura final se determinó con el promedio de las cinco lecturas tomadas de forma aleatoria conforme a la metodología descrita por (Cao *et al.*, 2007).

Permeabilidad al vapor de agua. Se determinó gravimétricamente a 25 °C de acuerdo con el método E96-80 descrito por la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) modificado según (Gontard, 1993) y (Vicentini, 2003). Los bioplásticos se cortaron en forma circular con un diámetro de 3 cm introducidos en vasos volumétricos (adaptados), con agua destilada. Los vasos se colocaron a 25 °C en un desecador con sílica. El peso del vaso se determinó cada 24 horas durante nueve días a través de una balanza analítica. El flujo de permeabilidad al vapor de agua (Fva) se calculó según la ecuación 9.

$$\text{Fva} = \frac{g}{tA} \quad [9]$$

Dónde g es la pérdida de peso, t el tiempo total en horas y A es el área de permeabilidad. La permeabilidad al vapor de agua (Pva) se calculó a partir de la ecuación 10.

$$\text{Pva} = (\text{Fva}) \times \left(\frac{X}{\Delta P} \right) \quad [10]$$

Donde X es la media del espesor del bioplástico y la diferencia de presión de vapor del medioambiente que contiene el desecador (0 kPa, 25 °C) y el agua pura (3167 kPa a 25 °C).

Solubilidad en agua. La solubilidad en agua del bioplástico se determinó de acuerdo con la metodología propuesta por (Gontard *et al.*, 1992) con adaptación. Los bioplásticos fueron cortados en forma circular con un diámetro de 2 cm y también fueron pesados, luego se sumergieron en agua destilada en Beakers con 50 mL de agua destilada. Se agitaron lentamente a 25 °C por 24 h. Después se retiraron las muestras y se secaron (105 ± 2 °C durante 24 h) en un horno para determinar el peso del material que no fue solubilizado. La solubilidad se expresa de acuerdo con la ecuación 11.

$$\% \text{ Solubilidad} = \left(1 - \left(\frac{PI-PF}{PI}\right)\right) \times 100 \quad [11]$$

Dónde PI es el peso inicial del bioplástico y PF es el peso final del material seco que no se solubilizo.

Color. El color del bioplástico se determinó por Colorflex Hunterlab® donde se utilizaron los valores L^* , a^* y b^* . Dónde:

- L = luminosidad para lo cual se utilizó las siguientes denominaciones cero significa negro y 100 significa blanco.
- Donde a = (- 80 a cero= verde, rojo= cero a 100).
- Donde b = (-100 a cero= azul, amarillo= cero a 100).
- ΔE (diferencia total del color).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad [12]$$

Delta E (ΔE) es el resultado de la raíz cuadrática de la suma de la diferencia de luminosidad (ΔL), de tono verde-rojo (Δa) y de tono azul-amarillo (Δb) que expresa el diferencial total del color de la comparación de dos muestra (Alcántara, sf). Se realizaron tres repeticiones para cada muestra en una placa de vidrio de 3 cm de diámetro.

Medida de opacidad. Para la medición de la opacidad aparente se utilizó un espectrofotómetro. Donde se utilizó el aire como control. Bajo estas condiciones, la banda de longitud de onda de barrido de luz visible fue de 500 nm para cada película y la opacidad de la película se calculó según la ecuación 13.

$$\text{Opacidad} = \frac{A_{500}}{T} \quad [13]$$

Donde A_{500} es la absorbancia a 500 nm y T es el espesor del bioplástico 30×15 (mm) (Cho y Rhee 2004; Shiku *et al.*, 2004). El análisis fue realizado por triplicado.

Propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas de interés para este estudio fueron elongación y perforación. Ambas pruebas se realizaron en un Analizador de Textura CT3 4500. Se realizaron 10 pruebas a cada muestra.

Elongación. Mediante la prueba de elongación podemos derivar tres propiedades: Tensión, deformación y módulo de elasticidad (Vicentini, 2003). Las propiedades expresan la resistencia de un material a la elongación y a la ruptura, cuando se somete a una tensión, el módulo de elasticidad indica cuan rígido es un material (Oliveira *et al.*, 1996). El alargamiento a la ruptura y módulo de elasticidad se determinó basándose en el método D 828-95a de la ASTM 1995.

Las películas se cortaron en piezas de 15 mm de ancho y 40 mm de largo. La distancia inicial (l_0) entre las mordazas fue de 30 mm y la velocidad de tracción de 0.9 mm/s. La tensión de ruptura se calculó dividiendo la relación de la fuerza entre el área de la sección transversal inicial de la película: y la deformación a la ruptura considerando como la deformación lineal $[(l - l_0) / l_0]$, se determinó por la curva de tensión-deformación. El módulo de elasticidad se calculó como la pendiente de la región lineal de la curva de tensión en función a la deformación.

Perforación. La resistencia a la fuerza y ruptura se determinaron mediante las pruebas de perforación de acuerdo con la metodología establecida por (Gontard, 1991), (Vicentini, 2003) y (Rocha, 2009) con adaptación. Las muestras se cortaron en 4 cm de longitud y 1.5 cm de ancho y se colocaron en un vaso gravimétrico, donde se atravesó con una sonda de 0.3 cm de diámetro, moviéndose a una velocidad de 0.1 cm/s. Y la deformación se calculó considerando el desplazamiento de la sonda hasta la ruptura del bioplástico y la distancia media del bioplástico según la ecuación 14.

$$\text{Deformación (\%)} = \frac{\sqrt{(b^2 + a^2)}}{40} \times 100 \quad [14]$$

Degradación. La degradación del bioplástico se determinó de acuerdo a la metodología propuesta por (López *et al.*, 2010), modificada. Los bioplásticos se cortaron en forma rectangular de 6×2 cm. Se tomaron fotos para la cuantificación del área mediante el programa Image J y luego se enterraron las muestras a 15 cm de profundidad en una calicata de 50×25 cm ubicada contiguo al Laboratorio de Análisis de alimentos de Zamorano. Donde las características fisicoquímicas del suelo; humedad, pH, materia orgánica, textura y relación carbono nitrógeno fueron determinadas en el Laboratorio de Suelos de Zamorano.

Las condiciones climáticas como temperatura humedad relativa y precipitación fueron monitoreadas por la estación meteorología de Zamorano, durante 15 días. Para realizar este análisis se enteraron cinco muestras de cada tratamiento para no interrumpir el proceso de degradación del bioplástico y se recopilaron los datos cada tres días hasta completar los 15 días.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de harina de albedo de maracuyá. La caracterización de la materia prima es muy importante para saber o justificar el comportamiento durante los procesos a los cuales serán sometidos. El tratamiento térmico provoca grandes cambios en la materia, especialmente cuando son procesados con agua, ocurre el fenómeno de hidratación cambiando su estructura química (Alves, 2013). En el Cuadro 4 se detalla la caracterización de la harina de albedo de maracuyá.

Cuadro 4. Composición de la harina de albedo de maracuyá.

Composición	Harina de albedo de maracuyá	Cv (%)
Humedad	10.23	0.35
ISA %	7.20	0.26
IAA g gel/g materia seca	8.50	0.06

El índice de solubilidad en agua (ISA) se vio afectado por la temperatura, ya que a mayor temperatura el ISA se incrementa. Este comportamiento se atribuye a los rompimientos de los enlaces en la estructura química del material (Lee *et al.*, 1999). De acuerdo con lo mencionado por varios autores (Gomez y Aguilera, 1984), a bajo contenido de humedad y altas temperaturas se incrementa la solubilidad de los materiales, favoreciendo a la disminución de la viscosidad. El valor para el índice de absorción de agua (IAA) es menor comparado con el valor obtenido en el ISA, esto se debe a la capacidad de retención de agua de la pectina que tiene la harina de albedo de maracuyá.

Granulometría. Es la medición de los granos de una forma sedimentaria y el cálculo del tamaño de la partícula por una escala granulométrica. En el Cuadro 5 se detalló la distribución del tamaño de las partículas de la harina de albedo de maracuyá.

Cuadro 5. Distribución granulométrica de la harina de albedo de maracuyá.

Número de tamiz	Apertura en Micrones	% Retención
14	1,410	0.31
40	425	0.79
60	250	14.28
80	180	16.08
200	75	60.43
FINOS	37	8.09

La molienda que se dio al albedo de maracuyá no fue suficiente para hacer harina con un tamaño de partículas similares a la de un almidón. El mayor porcentaje de las partículas se concentró en un rango de 75 a 250 μm (Figura 1), valores similares fueron encontrados en el estudio realizado por (106 a 300) μm (Alves 2013).

Según Munive (2009) el almidón de maíz tiene un tamaño de partícula de 300 μm representando el 97.14% y el 2.86% restante tiene una granulometría mayor a 300 μm . el almidón de yuca el 98.1% presenta un tamaño de partícula de 212 μm y el 1.9% presenta un tamaño de partícula de 425 μm (Alvarado 2009).

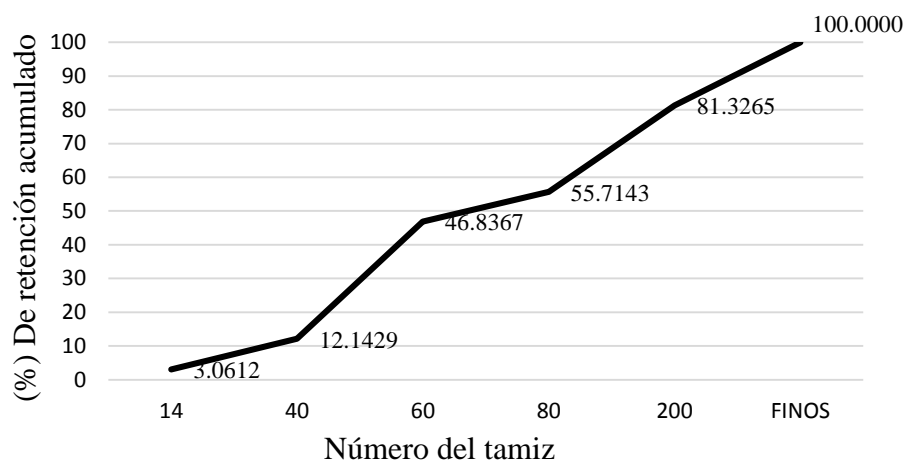


Figura 1. Porcentaje de retención acumulado de las partículas de harina de albedo de maracuyá en cada tamiz.

Espesura. Es una variable importante para las propiedades y aplicaciones de bioplásticos. Se entiende por espesura la distancia perpendicular entre dos superficies, conociendo la espesura es posible obtener información sobre las propiedades reológicas y de barrera a los gases o vapor de agua (Oliveira *et al.*, 1996). Al determinar el espesor es posible evaluar la homogeneidad de una película y donde las variaciones en la espesura del material presentan problemas especialmente en análisis reológicas y de barrera (CETEA, 1996).

No se encontró diferencia significativa entre las variables independientes en el análisis de varianza (ANOVA) a una $P < 0.1$. El R^2 (0.44) encontrado que fue muy inferior al aceptado para que el modelo sea considerado predictivo. Por lo que los gráficos de superficie respuesta no se construyeron ni se generó el modelo de la ecuación de predicción, así los resultados fueron discutidos por un análisis de separación de medias por LSmeans a una $P < 0.05$.

La elaboración de bioplásticos por el método casting, donde el secado ocurre por evaporación del solvente y el control de la espesura del bioplástico se torna muy difícil cuando se trabaja con soluciones filmogénicas muy viscosas generando dificultad de dispersar el material (Sobral, 1999).

La incorporación de celulosa en la matriz del bioplástico dificulta la estandarización del espesor, sobre todo en las películas obtenidas por el método de casting (Espitia *et al.*, 2011). El peso está relacionado directamente con el espesor donde se define como el peso de una determinada zona, que está directamente relacionada con la fuerza del bioplástico, donde los pesos superiores ofrecen mayor resistencia mecánica (Oliveira *et al.*, 1996).

En el Cuadro 6 se presentan la separación de medias por LSmeans a una $P < 0.05$ donde se encontraron diferencias significativas y similitudes entre los tratamientos, con un rango de 0.19 a 0.45 mm de grosor. El tratamiento con mayor grosor fue 11, dicho tratamiento posee 3% de harina de albedo de maracuyá, 41.6% de glicerol y una relación de 50% de almidón de maíz y 50% de almidón de yuca, el tratamiento es un punto axial ($-\alpha$) negativo a la variable glicerol, que expresa el menor porcentaje de glicerol del experimento. El tratamiento con menor grosor fue 17, constaba de 3% de harina de albedo de maracuyá, 50% de glicerol y una relación de 50% de almidón de maíz y 50% de almidón de yuca, este tratamiento fue la repetición del punto central del experimento de las tres variables del estudio.

Cuadro 6. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en la espesura del bioplástico.

Tratamiento	Harina de maracuyá	Glicerol	Relación almidón Maíz/Yuca	Espesura
	(%)	(%)	(%)	(mm ± DE) [¥]
1	1.20	45.00	25.00	0.22±0.01 ^{FG}
2	4.20	45.00	25.00	0.32± 0.04 ^{CDE}
3	1.20	55.00	25.00	0.27±0.06 ^{EFG}
4	4.20	55.00	25.00	0.31±0.06 ^{CDE}
5	1.20	45.00	75.00	0.36±0.13 ^{BCD}
6	4.20	45.00	75.00	0.38±0.05 ^{ABC}
7	1.20	55.00	75.00	0.26±0.03 ^{EFG}
8	4.20	55.00	75.00	0.29±0.04 ^{DEF}
9	0.00	45.00	50.00	0.21±0.01 ^G
10	5.00	45.00	50.00	0.24±0.02 ^{EFG}
11	3.00	41.60	50.00	0.45±0.02 ^A
12	3.00	58.40	50.00	0.26±0.02 ^{EFG}
13	3.00	50.00	8.00	0.24±0.02 ^{EFG}
14	3.00	50.00	92.10	0.20±0.02 ^G
15	3.00	50.00	50.00	0.38±0.08 ^{ABC}
16	3.00	50.00	50.00	0.29±0.03 ^{DEF}
17	3.00	50.00	50.00	0.19±0.07 ^G
18	3.00	50.00	50.00	0.37±0.14 ^{BCD}
19	3.00	50.00	50.00	0.42±0.14 ^{AB}
20	3.00	50.00	50.00	0.36±0.08 ^{BC}
Coefficiente de Variación (%)				17.37

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a $P < 0.05$

¥: Media ± Desviación estándar.

Permeabilidad al vapor de agua (Pva). Es la cantidad de vapor de agua que pasa por unidad de superficie de un material de espesura conocida, que es inducida por una diferencia de presiones entre dos superficies específicas, con condiciones de temperatura y humedad relativa específica ASTM E96-80. (ASTM 1089).

El proceso de permeabilidad de vapor consta de tres etapas. El primer índice o coeficiente de difusión sucede cuando el agua es absorbida de la zona de más alta humedad relativa hacia la película. La segunda al integrarse a ésta, generando una diferencia de presiones parciales en la estructura de la misma (matriz), donde se toma en cuenta el grosor y el área de la película. En la tercera etapa se da el fenómeno de desorción, considerando el área donde presenta la menor humedad relativa (Trejo *et al.*, 2001).

En el Cuadro 7 se muestran los diferentes niveles de Pva del bioplástico a base de harina de albedo de maracuyá. Se encontró una diferencia estadística en las medias desde 0.78 hasta 1.86 (g.mm/h.m².kPa). El tratamiento 11 fue el que presentó el mayor índice de Pva, dicho tratamiento está compuesto por 3% de harina de albedo de maracuyá, 41.6% de glicerol y una proporción de 50% de almidón de maíz y 50% de almidón de yuca. Por otro lado los tratamientos 14 y 17 presentaron una menor diferencia estadística, lo que significa una menor permeabilidad al vapor de agua. Los valores de permeabilidad al vapor de agua encontrados en este estudio fueron menores en 62.94% en comparación con los valores 5.02 (g.mm/h.m².kPa) reportados (Muñoz, 2014) en bioplásticos de almidón de maíz, yuca y glicerol. Esto se atribuye a la incorporación de macropartículas a la matriz del bioplástico, donde la transmisión del vapor de agua se torna más compleja debido a la no linealidad de los isothermas de absorción (Kristo y Biliaderis, 2007).

Cuadro 7. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en la Permeabilidad al vapor de agua.

Tratamiento	Harina de maracuyá	Glicerol	Relación almidón Maíz/Yuca	Permeabilidad al vapor de agua
	(%)	(%)	(%)	(g.mm/h.m ² .kPa ± DE) [¥]
1	1.20	45.00	25.00	1.27±0.13 ^{BCD}
2	4.20	45.00	25.00	1.33±0.29 ^{BCD}
3	1.20	55.00	25.00	1.25±0.05 ^{BCD}
4	4.20	55.00	25.00	1.49±0.002 ^{ABC}
5	1.20	45.00	75.00	1.57±0.05 ^{AB}
6	4.20	45.00	75.00	1.39±0.07 ^{BCD}
7	1.20	55.00	75.00	1.32±0.08 ^{BCD}
8	4.20	55.00	75.00	1.06±0.17 ^{CDE}
9	0.00	45.00	50.00	1.16±0.16 ^{BCDE}
10	5.00	45.00	50.00	1.36±0.05 ^{BCD}
11	3.00	41.60	50.00	1.86±0.70 ^A
12	3.00	58.40	50.00	1.01±0.18 ^{DE}
13	3.00	50.00	8.00	1.38±0.20 ^{BCD}
14	3.00	50.00	92.10	0.78±0.19 ^E
15	3.00	50.00	50.00	1.24±0.14 ^{BCD}
16	3.00	50.00	50.00	1.04±0.03 ^{DE}
17	3.00	50.00	50.00	0.79±0.19 ^E
18	3.00	50.00	50.00	1.21±0.06 ^{BCDE}
19	3.00	50.00	50.00	1.33±0.14 ^{BCD}
20	3.00	50.00	50.00	0.99±0.26 ^{DE}
Coefficiente de Variación (%)				12.84

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a P<0.05

¥: Media ± Desviación estándar.

De acuerdo a los resultados estadísticos del Cuadro 8 la variable independiente glicerol lineal X_2 y cuadrática X_2^2 fue significativa estadísticamente a una $P < 0.05$. El coeficiente múltiple de determinación R^2 revelo que el 54.8% de las variables se ajustaron al modelo y el 45.2% no se ajustaron. La falta de ajuste no fue significativa, pero el R^2 fue menor a 0.6, por lo que el modelo de superficie respuesta muestra un modelo tendencioso sobre la permeabilidad al vapor de agua (Thompson, 1982) (Rocha, 2009).

Cuadro 8. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en la permeabilidad al agua (Pva) del bioplástico.

Coeficientes	Pva	P
Intercepto	1.11E+00	1.71E-05
X₁	1.59E-02	7.66E-01 n.s
X₁²	-2.41E-02	6.33E-01 n.s
X₂	-1.31E-01	3.40E-02 **
X₂²	1.26E-01	4.66E-02 **
X₃	-6.55E-02	2.14E-01 n.s
X₃²	4.46E-02	3.72E-01 n.s
X₁×X₂	-1.43E-02	7.90E-01 n.s
X₁×X₃	-6.00E-02	3.65E-01 n.s
X₂×X₃	-5.81E-02	3.79E-01 n.s
Falta de Ajuste		2.00E-01 n.s
R²		0.54

X₁: H maracuyá, X₂: % Glicerol, X₃ Relación M/Y

n.s = Significantes, ***= Significantes a $p < 0.1$, ** = Significante a $p < 0.05$, *= Significantes a $p < 0.001$

En base a los resultados del Cuadro 8 se construyó la ecuación 15 que ayuda a predecir el comportamiento de las variables significativas sobre la permeabilidad al vapor de agua:

$$Pva \text{ (g.mm/h.m}^2\text{.kPa)} = 1.114 - 0.131X_2 + 0.125X_2^2 \quad [15]$$

En base al modelo matemático (ecuación 15), se elaboró un gráfico de superficie respuesta (Figura 2) que presenta una relación con una variable significativa y una variable no significativa estadísticamente a una $P < 0.1$. La variable lineal glicerol presentó un efecto negativo lo que nos indica que a mayor contenido de glicerol, menor permeabilidad al vapor de agua.

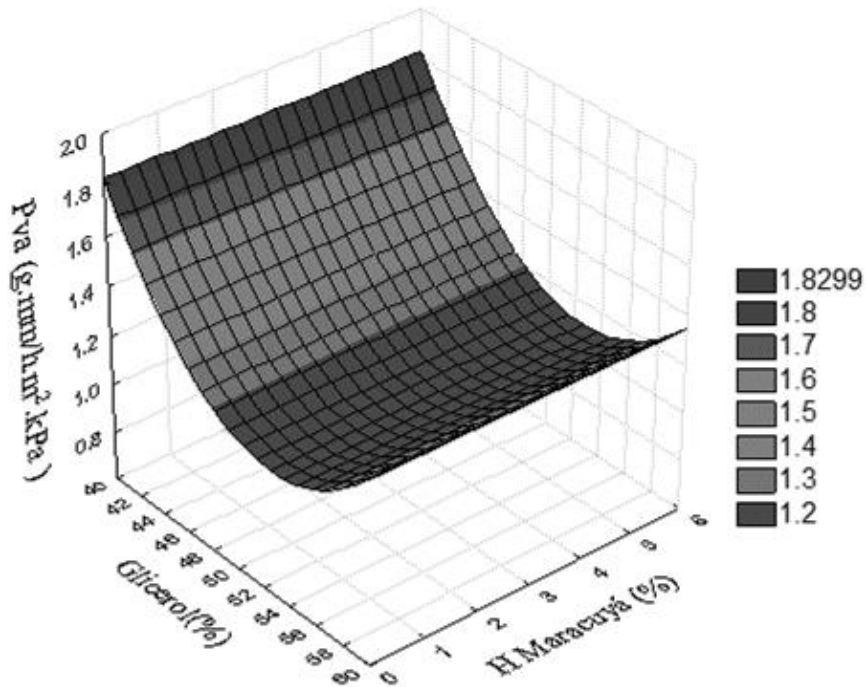


Figura 2. Efecto de las variables independientes; porcentaje de glicerol y harina de albedo de maracuyá, en la permeabilidad al vapor de agua del bioplástico.

Por una unidad adicional de glicerol disminuye el flujo del vapor de agua en 0.131 g.mm/h.m²kPa y una disminución en la unidad de glicerol presenta un aumento en la permeabilidad de vapor de agua. Según Alves (2013) cuando se adiciona pectina a la matriz del bioplástico aumenta la permeabilidad de vapor de agua. Esto se atribuye al carácter hidrofílico del material plastificante y al contenido de pectina que aumenta la cantidad de moléculas hidrofílicas (HO₂) en la matriz del bioplástico permitiendo una mayor permeabilidad del vapor de agua.

Solubilidad. Es la medida de la capacidad que tiene una determinada sustancia de disolverse en otra, expresada como el porcentaje de disolución de la primera sustancia en la segunda (Ferreira, 1986). Es una propiedad importante de la película relacionada con el tipo de aplicación y el comportamiento que puede tener cuando se sumerge en agua o cuando entra en contacto con ambientes húmedos (Petrikoski, 2013).

En el Cuadro 9 se presentan los resultados del porcentaje de material solubilizado en agua del bioplástico, con un rango desde 54.76 hasta 39.88% del material solubilizado. Según los resultados el tratamiento 20 presentó la mayor diferencia estadística, atribuyéndose a la mayor cantidad de material solubilizado. El tratamiento 20 posee 3% de harina de albedo de maracuyá, 50% de glicerol y 50% de almidón de maíz y 50% de almidón yuca, este tratamiento es un punto central de las tres variables independientes, la diferencia en solubilidad entre las repeticiones del punto central pudo haber sido ocasionado por la diferencia en la espesura. Por otro lado el tratamiento nueve presentó la menor diferencia estadística, atribuyéndose a la menor solubilidad del bioplástico. El tratamiento nueve posee

0% de harina de albedo de maracuyá, 45% de glicerol y 50% de almidones de maíz, 50% de almidón de yuca, éste tratamiento es un punto axial negativo ($-\alpha$) para la variable harina de albedo de maracuyá que es el control del experimento sobre esta variable.

Se encontraron valores 54.76% de solubilidad en este estudio, datos muy similares fueron repostados por (Failey *et al.*, 1996) en la solubilidad del bioplástico de aislado proteico de suero de leche con valores encima de 50% del material solubilizado, en bioplásticos a base de aislado proteico de soja, con solubilidad entre 26.81% a 39.41% (Kunte *et al.*, 1997) y en bioplásticos a base de gluten de trigo presentaron una solubilidad de 31,5 a 100% (Gontard, 1991).

Cuadro 9. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en la solubilidad en agua a (25 ± 2 C°).

Tratamiento	Harina de maracuyá (%)	Glicerol (%)	Relación almidón Maíz/Yuca (%)	Solubilidad (% \pm DE)[¥]
1	1.20	45.00	25.00	44.40 \pm 0.06 ^H
2	4.20	45.00	25.00	43.53 \pm 0.59 ^H
3	1.20	55.00	25.00	49.40 \pm 0.59 ^{EF}
4	4.20	55.00	25.00	52.20 \pm 1.15 ^{BCD}
5	1.20	45.00	75.00	45.78 \pm 0.74 ^{GH}
6	4.20	45.00	75.00	50.69 \pm 1.34 ^{DEF}
7	1.20	55.00	75.00	52.30 \pm 0.46 ^{BCD}
8	4.20	55.00	75.00	52.90 \pm 0.80 ^{ABCD}
9	0.00	45.00	50.00	39.88 \pm 1.42 ^I
10	5.00	45.00	50.00	43.55 \pm 0.78 ^H
11	3.00	41.60	50.00	47.15 \pm 0.21 ^{FG}
12	3.00	58.40	50.00	53.22 \pm 0.19 ^{ABC}
13	3.00	50.00	8.00	49.54 \pm 0.25 ^{EF}
14	3.00	50.00	92.10	49.57 \pm 0.08 ^{EF}
15	3.00	50.00	50.00	53.31 \pm 2.20 ^{ABC}
16	3.00	50.00	50.00	50.64 \pm 0.73 ^{DEF}
17	3.00	50.00	50.00	53.76 \pm 0.76 ^{AB}
18	3.00	50.00	50.00	51.08 \pm 0.31 ^{CDE}
19	3.00	50.00	50.00	52.15 \pm 0.2.79 ^{BCD}
20	3.00	50.00	50.00	54.76 \pm 4.37 ^A
Coefficiente de Variación (%)				2.86

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a $P < 0.05$

¥: Media \pm Desviación estándar.

De acuerdo al Cuadro 10, las tres variables lineales y cuadráticas X_1 , X_2 y X_3 (harina de albedo de maracuyá, glicerol y relación almidón de maíz/yuca) fueron significativas estadísticamente y además presentaron interacción entre las variables X_1 , X_2 a una $P < 0.1$ sobre la solubilidad en agua del bioplástico con la diferencia que tienen un signo negativo, que indica una disminución en la solubilidad por efecto de la adición de harina de albedo de maracuyá, glicerol y almidón de maíz/yuca. El R^2 indica que el 81% de los datos de la variable dependiente se ajustaron al modelo y el 19% de los datos no se ajustaron al modelo de superficie respuesta. La falta de ajuste fue significativa a una $P < 0.05$ lo que indica ser un modelo tendencioso según Thompson (1982) y Rocha (2009).

Cuadro 10. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en solubilidad en agua % de un bioplástico.

Coefficientes	Solubilidad en agua (%)	P
Intercepto	5.27E+0.1	3.78E-09
X₁	2.24E+00	3.86E-03 *
X₁²	-2.99E+00	7.89E-04 n.s
X₂	1.62E+00	9.32E-03 *
X₂²	-9.12E-01	8.01E-02 ***
X₃	1.67E+00	8.96E-03 *
X₃²	-1.14E+00	3.44E-02 **
X₁×X₂	1.16E+00	4.68E-02 **
X₁×X₃	-7.82E-01	1.97E-01 ***
X₂×X₃	6.32E-01	2.83E-01 n.s
Falta de Ajuste		3.28E-02 **
R²		0.81

X_1 : H maracuyá, X_2 : % Glicerol, X_3 Relación M/Y

n.s = Significantes, ***= Significantes a $p < 0.1$, ** = Significante a $p < 0.05$, * = Significantes a $p < 0.01$

En base a los resultados del Cuadro 10 se construyó la ecuación matemática que ayuda a predecir el comportamiento de las variables significativas a una $P < 0.1$ de solubilidad en agua:

$$\text{Solubilidad agua (\%)} = 52.740 + 2.239X_1 - 2.991X_1^2 + 1.622X_2 - 0.911X_2^2 + 1.665X_3 - 1.143X_3^2 + 1.159X_1 \times X_2 \quad [16]$$

En base a la ecuación 16 se crearon gráficos de superficie respuesta Figura 3. Donde muestra un cambio en la solubilidad sobre el aumento o disminución de las variables independientes.

En la Figura 3 se puede observar el efecto ocasionado en la solubilidad al aumentar el contenido de almidón de maíz, disminuir el almidón de yuca y un aumento en el contenido de la harina de maracuyá en la matriz del bioplástico la solubilidad aumenta. Esto pudo ser ocasionado al contenido de fibra soluble y contenido de pectina de la harina de maracuyá

(Alves, 2013). En la Figura 4, con un aumento de glicerol y la cantidad de almidón de maíz y una disminución de la cantidad de almidón de yuca en la proporción de almidones el material solubilizado aumenta. Esto se atribuye al carácter hidrofílico del plastificante y del almidón.

En la Figura 5 con el aumento del glicerol y la harina de albedo de maracuyá se incrementa la solubilidad, en estudio realizado por (Bastidas *et al.*, 2005) encontraron 100% de solubilidad en películas a base de pectina. Por lo general los polisacáridos son altamente higroscópicos y se desintegran rápidamente al entrar en contacto con el agua. La solubilidad del bioplástico puede ser una alternativa para la aplicación de productos que necesitan de una hidratación previa a su consumo, o para el recubrimiento de semillas que necesitan de una rápida germinación como portadores de aditivos necesarios para el crecimiento de la misma (Batista *et al.*, 2005).

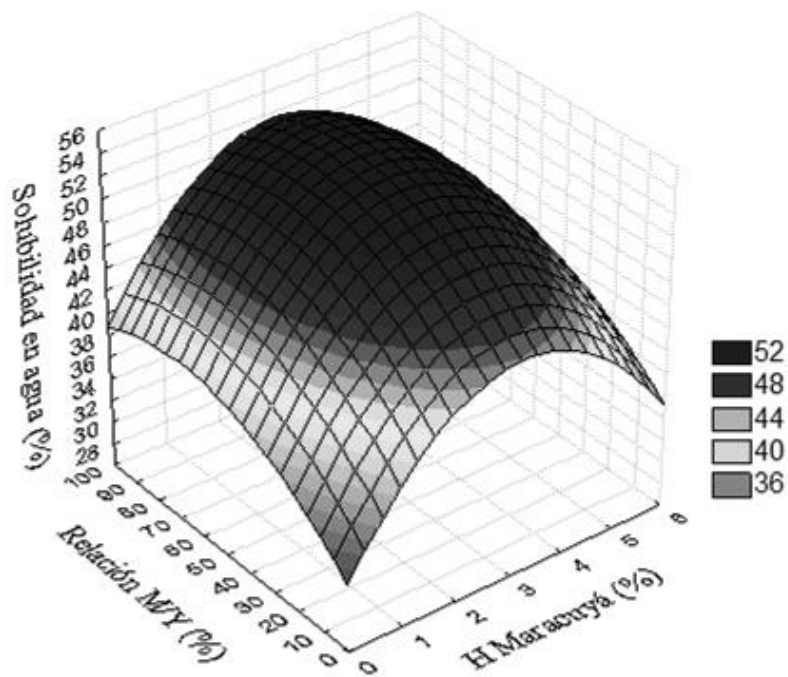


Figura 3. Efecto de las variables independientes; relación almidón de maíz/yuca y porcentaje de glicerol, en solubilidad en agua del bioplástico.

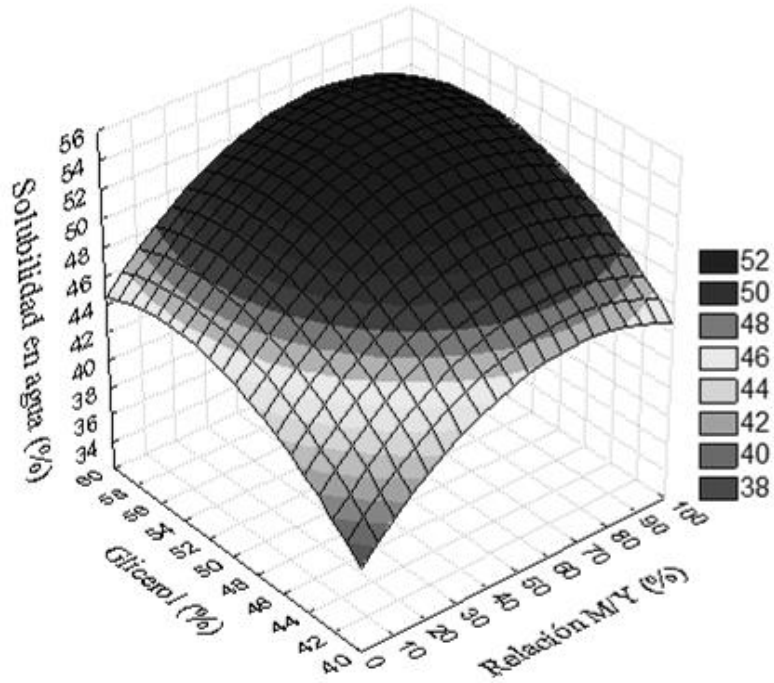


Figura 4. Efecto de las variables independientes; relación almidón de maíz/yuca y porcentaje de glicerol, en solubilidad en agua del bioplástico.

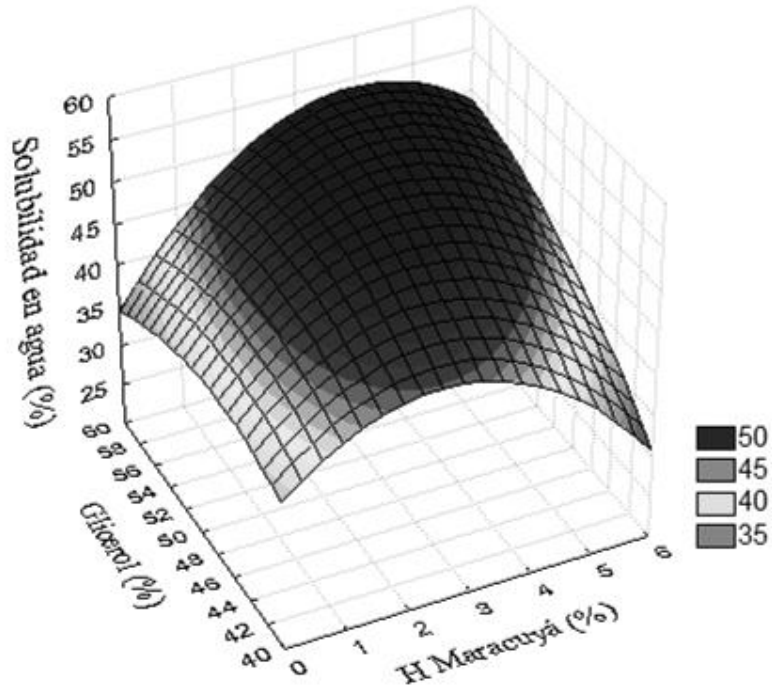


Figura 5. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y relación almidón de maíz/yuca, en solubilidad en agua del bioplástico.

Diferencia de color. El color es un atributo fundamental e importante en el producto, principalmente en relación a su uso. Por eso es importante determinar el color del bioplástico biodegradable que puede actuar como embalaje (Rocha, 2009).

En el Cuadro 11, se detallan los resultados del análisis de diferencia de color donde variaron de 2.16 hasta 36.57. El tratamiento 8 (4.20% de harina de albedo de maracuyá, 55% de glicerol y 75% de almidón de maíz y 25% de almidones de yuca) desarrollo una mayor diferencia en color y el tratamiento siete presentó una menor diferencia de color (1.20% de harina de maracuyá, 55% de glicerol y una relación de 75% de almidón de maíz y 25% de almidón de yuca. Lo que diferencia un tratamiento de otro es la cantidad de harina de albedo de maracuyá que lleva cada uno en su formulación. Donde Aleves (2013) reportó un aumento en el color del bioplástico con el aumento de la harina de albedo de maracuyá.

Cuadro 11. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en el diferencial de color.

Tratamiento	Harina de maracuyá	Glicerol	Relación almidón Maíz/Yuca	ΔE
	(%)	(%)	(%)	(± DE)
1	1.20	45.00	25.00	4.13±2.06 ^{FG}
2	4.20	45.00	25.00	24.72±1.11 ^{ABC}
3	1.20	55.00	25.00	4.54±1.74 ^{FG}
4	4.20	55.00	25.00	7.38±1.12 ^{DEFG}
5	1.20	45.00	75.00	19.39±11.24 ^{BCDE}
6	4.20	45.00	75.00	14.67±10.68 ^{BCDEFG}
7	1.20	55.00	75.00	2.16±2.46 ^G
8	4.20	55.00	75.00	36.57±2.52 ^A
9	0.00	45.00	50.00	4.79±4.96 ^{FG}
10	5.00	45.00	50.00	20.81±9.34 ^{BCD}
11	3.00	41.60	50.00	23.09±13.96 ^{ABC}
12	3.00	58.40	50.00	17.76±18.36 ^{BCDEF}
13	3.00	50.00	8.00	7.03±8.803 ^{DEFG}
14	3.00	50.00	92.10	27.89±6.81 ^{AB}
15	3.00	50.00	50.00	21.91±3.92 ^{BC}
16	3.00	50.00	50.00	10.27±6.84 ^{BCDEFG}
17	3.00	50.00	50.00	15.55±13.06 ^{BCDEFG}
18	3.00	50.00	50.00	4.02±0.07 ^{FG}
19	3.00	50.00	50.00	5.82±0.59 ^{EFG}
20	3.00	50.00	50.00	11.71±1.01 ^{CDEFG}
Coefficiente de Variación (%)				49.89

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a P<0.05

¥: Media ± Desviación estándar.

Según el Cuadro 12 las variables lineales glicerol $P < 0.05$ y relación de almidones presentan un efecto positivo lo que nos indica que al aumentar estas variables se incrementa la diferencia del color. El R^2 nos indica que el 53% de los datos de diferencia de color se adaptan al modelo de superficie respuesta y el otro 47% no se adaptan al modelo, esto se debe al error experimental. Y la falta de ajuste no fue significativa por lo que este modelo clasifica como tendencioso (Thompson, 1982) (Rocha, 2009).

Cuadro 12. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en el diferencial de color de un bioplástico.

Coeficientes	ΔE	P
Intercepto	9.58E+00	2.90E-02
X₁	6.29E+00	4.12E-02**
X₁²	1.63E-01	9.43E-01 ns
X₂	-1.00E+00	6.47E-01 ns
X₂²	-3.25E-01	8.87E-01 ns
X₃	5.01E+00	6.25E-02***
X₃²	2.45E+00	2.90E-01 ns
X₁×X₂	3.51E+00	1.88E-01 ns
X₁×X₃	4.89E-01	8.65E-01 ns
X₂×X₃	3.97E+00	2.07E-01 ns
Falta de Ajuste		2.33E-01 ns
R²		0.53

X₁: H maracuyá, X₂: % Glicerol, X₃ Relación M/Y

n.s = Significantes, * = Significantes a $p < 0.01$, ** = Significante a $p < 0.05$, *** = Significantes a $p < 0.1$

De acuerdo con las variables independientes seleccionadas por medio de su significancia $P < 0.1$ se generó la siguiente ecuación 17.

$$\Delta E = 9.579 + 6.294X_1 + 5.009X_3 \quad [17]$$

En base a la ecuación 17 se crearon las figuras 6 y 7 del modelo de superficie respuesta, para la diferencia de color (ΔE), donde se observa el mayor diferencial de color del bioplástico con el incremento en la cantidad de harina de maracuyá y la relación de almidón de maíz con respecto al almidón de yuca en la Figura 6. En la Figura 7 se puede observar que la variable glicerol no influye en la diferencia de color.

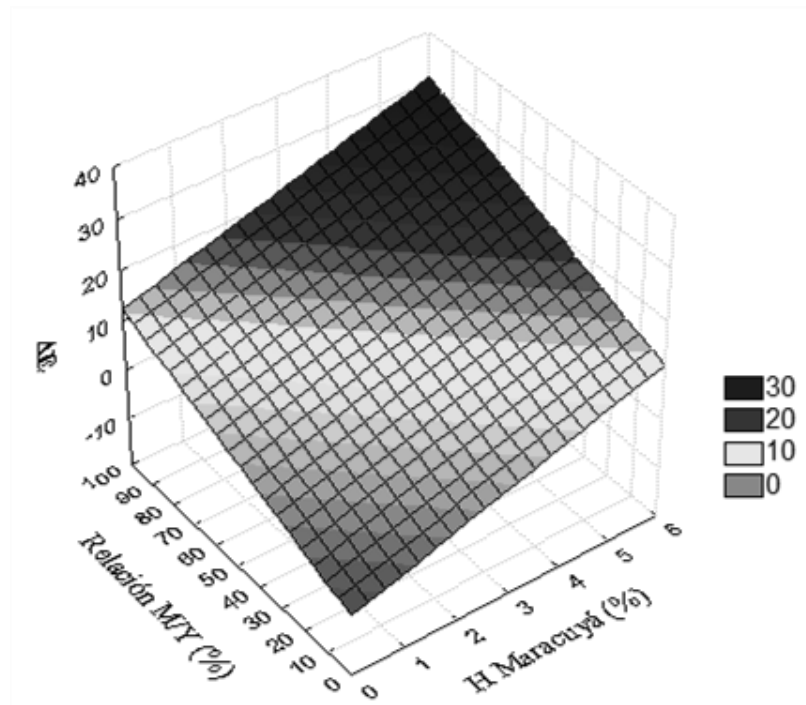


Figura 6. Superficie respuesta de los efectos de las variables independientes sobre la diferencia de color del bioplástico.

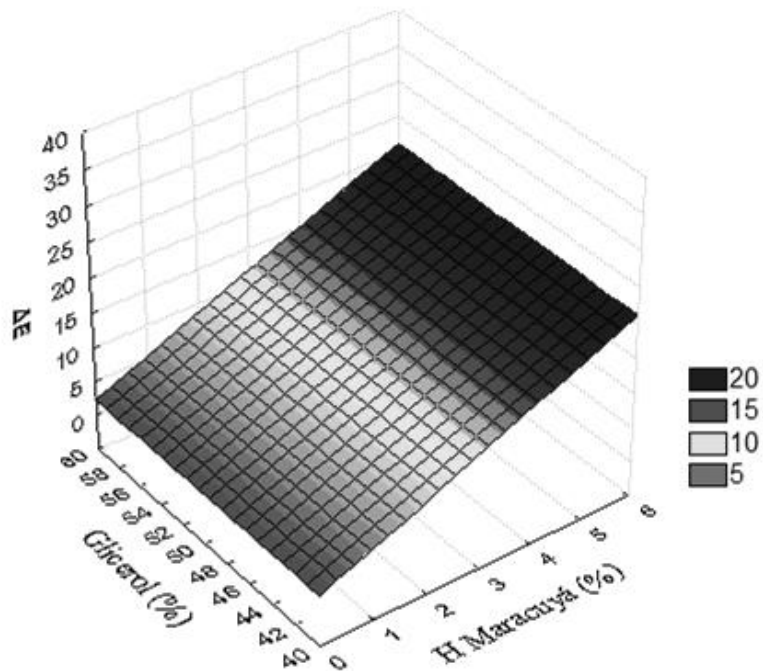


Figura 7. Superficie respuesta de los efectos de las variables independientes sobre la diferencia de color del bioplástico.

Los bioplásticos obtenidos presentaron valores más altos de diferencia de color (2.16 a 36.57) que los bioplásticos obtenidos por Sobral (2000) a base de 1 g de proteína miofibrilares de tilapia en 100 g de solución filmogénica (ΔE de 7 a 8 nm). Rocha, 2009 presentó valores de diferencia de color (8 a 17) en películas de almidón de yuca y extracto proteico de soja. Muñoz (2014), reportó valores de (29.54 hasta 47.64) en bioplásticos de glicerol y relación de almidones de maíz/yuca, valores inferiores se encontraron en este estudio.

Medición de la opacidad. Es una propiedad muy importante en el uso del bioplástico como revestimiento de un alimento o como embalaje de alimentos (Gontard *et al.*, 1992). De acuerdo con Oliveira (2007) se requieren bioplásticos más atractivos y claros para revestimientos, para mantener las características originales del producto y también es deseable una mayor opacidad para mantener las características del producto que son más sensibles a la luz.

Los bioplásticos deben presentar opacidad y colores atractivos y no deben ser alterados durante el tiempo de almacenamiento (Rocha, 2009). En el Cuadro 13 se detallan los resultados del análisis de opacidad donde se encontraron valores desde 4.15 hasta 1.48 nm. El tratamiento con mayor opacidad fue el nueve este es un punto axial negativo ($-\alpha$) para la variable harina de maracuyá y el tratamiento con menor opacidad fue el 15 este es el punto central. La diferencia entre estos tratamientos es la cantidad de harina de maracuyá y la relación de almidones de maíz/yuca. En el estudio realizado por Alves (2009), reportó que al incremento de la harina de cascara de maracuyá el valor de transmitancia de la luz se redujo. El grado de transparencia del bioplástico dependerá de la estructura del polímero utilizado, si más amorfo es más transparente y si más cristalino más opaco y también depende de su espesura (Crippa, 2006)

Cuadro 13. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en opacidad.

Tratamiento	Harina de maracuyá	Glicerol	Relación almidón Maíz/Yuca	Opacidad
	(%)	(%)	(%)	(± DE) [¥]
1	1.20	45.00	25.00	3.91±0.25 ^{AB}
2	4.20	45.00	25.00	2.48±0.99 ^{CDEFG}
3	1.20	55.00	25.00	3.43±0.48 ^{ABC}
4	4.20	55.00	25.00	2.36±0.74 ^{DEFG}
5	1.20	45.00	75.00	1.70±0.20 ^G
6	4.20	45.00	75.00	2.25±1.47 ^{EFG}
7	1.20	55.00	75.00	3.19±0.08 ^{ABCDE}
8	4.20	55.00	75.00	1.87±0.16 ^G
9	0.00	45.00	50.00	4.15±0.52 ^A
10	5.00	45.00	50.00	2.21±0.28 ^{EFG}
11	3.00	41.60	50.00	1.68±0.24 ^G
12	3.00	58.40	50.00	2.49±1.07 ^{DEFG}
13	3.00	50.00	8.00	1.51±0.32 ^G
14	3.00	50.00	92.10	2.15±0.38 ^{FG}
15	3.00	50.00	50.00	1.48±0.17 ^G
16	3.00	50.00	50.00	2.30±0.12 ^{EFG}
17	3.00	50.00	50.00	3.34±0.74 ^{ABCD}
18	3.00	50.00	50.00	1.96±0.24 ^G
19	3.00	50.00	50.00	1.86±0.10 ^G
20	3.00	50.00	50.00	3.05±0.87 ^{ABCDE}
Coefficiente de Variación (%)				19.30

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a P<0.05

¥: Media ± Desviación estándar.

En el Cuadro 14 la variable harina de maracuyá (P<0.05) presentó un efecto negativo, indicando que un aumento en este factor implica una disminución de la opacidad. El coeficiente de determinación demostró que los datos de opacidad se ajustaron en un 62% al modelo de superficie respuesta, pero el 38% de los datos no se ajustaron al modelo eso se atribuye al error experimental. La falta de ajuste no fue significativa, lo que nos indica que este modelo es de carácter predictivo de acuerdo con Thompson (1982) y Rocha (2009).

Cuadro 14. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la opacidad de un bioplástico.

Coeficientes	Opacidad	P
Intercepto	2.31E+00	4.14E-04
X₁	-5.26E-01	4.82E-02 **
X₁²	4.21E-01	7.70E-02 ***
X₂	1.73E-01	3.85E-01 n.s
X₂²	-5.09E-02	8.00E-01 n.s
X₃	-1.59E-01	4.27E-01 n.s
X₃²	-1.38E-01	4.81E-01 n.s
X₁×X₂	-8.33E-02	6.98E-01 n.s
X₁×X₃	2.23E-01	3.97E-01 n.s
X₂×X₃	2.25E-01	3.92E-01 n.s
Falta de Ajuste		5.47E-01 n.s
R²		0.62

X₁: H maracuyá, X₂: % Glicerol, X₃ Relación M/Y

n.s = Significantes, ***= Significantes a p<0.1, ** = Significante a p<0.05, *= Significantes a p<0.01

La ecuación polinomial 18 fue generada por la selección de las variables independientes significativas P<0.1.

$$\text{Opacidad (nm)} = 2.305 - 0.526X_1 + 0.421X_1^2 \quad [18]$$

En base a la ecuación polinomial 18 se construyo la gráfica de superficie respuesta para opacidad (Figura 8), donde se observo la disminución de opacidad con el incremento de harina de albedo de maracuyá. En estudio realizado por Alves (2013) se encontró el mismo comportamiento, que al incrementar la cantidad de harina de maracuyá menor fue la tasa de opacidad.

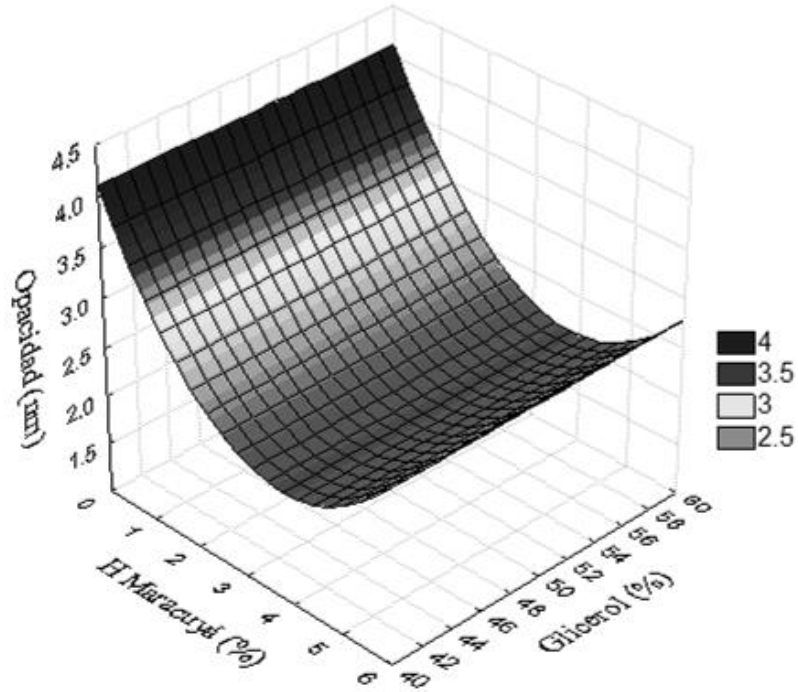


Figura 8. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y porcentaje de glicerol, en opacidad del bioplástico.

La transparencia u opacidad del bioplástico es consecuencia de la estructura química relacionada a la masa molecular del material (Davaco, 2006). El grado de transparencia del bioplástico dependerá de la estructura del polímero utilizado, si más amorfo es, más transparente y si más cristalino, más opaco y también influye su espesura (Crippa, 2006). En estudio realizado por (Sobral *et al.*, 2004) en bioplásticos de proteína miofibrilares y musculares sarcoplasmática de tilapia, a causa de la concentración de la proteína y el plastificante en la solución filmogénica, la diferencia de color y opacidad disminuyó con el aumento de glicerina. Los autores justifican este resultado al efecto de dilución provocado por la glicerina.

Fuerza de perforación. Por medio del análisis de perforación se determinó la fuerza necesaria (N) para que una determinada sonda perforara perpendicularmente el bioplástico. La fuerza aplicada fue en función al desplazamiento resultante a la deformación hasta el recorrido para llegar a un punto donde ocurre la fuerza de ruptura (Vicentini, 2003).

La deformación a la ruptura está relacionada con la longitud inicial de la película en la prueba para determinar la resistencia a la perforación (Sobral *et al.*, 1998). Esta prueba nos indica cuanto puede resistir el bioplástico antes de sufrir una ruptura a una cierta fuerza aplicada por un cierto tiempo, manteniendo su estructura original durante un alargamiento.

En el Cuadro 15 se encuentran los resultados de la fuerza de perforación del bioplástico a base de harina de albedo de maracuyá, donde se encontraron valores de 1.41 hasta 4.65 N. El tratamiento seis fue el que mayor fuerza de perforación presentó, éste tratamiento está

compuesto por 4.2% de harina de maracuyá, 45% de glicerol y 75% almidón de maíz y 25% de almidón de yuca. Resultados similares fueron encontrados por Alves (2013), donde los bioplásticos con mayor fuerza de perforación fueron los que tenían el 3% de harina de cascara de maracuyá.

El tratamiento con menor fuerza de perforación fue el control, éste posee 0% de harina de maracuyá, 45% de glicerol y 50% de almidón de maíz y 50% de almidón de yuca. La adición de proteínas de alto peso molecular, como colágeno favorecen a la formación de bioplásticos con buenas características mecánicas.

Cuadro 15. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en la fuerza de perforación.

Tratamiento	Harina de maracuyá (%)	Glicerol (%)	Relación almidón Maíz/Yuca (%)	Fuerza de perforación (N ± DE)
1	1.20	45.00	25.00	2.13±0.29 ^{HI}
2	4.20	45.00	25.00	3.39±1.09 ^{CDE}
3	1.20	55.00	25.00	2.50±0.48 ^{FGHI}
4	4.20	55.00	25.00	2.46±0.60 ^{FGHI}
5	1.20	45.00	75.00	4.11±0.97 ^{AB}
6	4.20	45.00	75.00	4.65±0.55 ^A
7	1.20	55.00	75.00	2.07±0.54 ^{IJ}
8	4.20	55.00	75.00	2.64±0.42 ^{EFGHI}
9	0.00	45.00	50.00	1.47±0.39 ^J
10	5.00	45.00	50.00	3.68±0.37 ^{BC}
11	3.00	41.60	50.00	3.71±1.24 ^{BC}
12	3.00	58.40	50.00	2.49±0.37 ^{FGHI}
13	3.00	50.00	8.00	2.70±0.62 ^{FGH}
14	3.00	50.00	92.10	3.55±0.61 ^{BCD}
15	3.00	50.00	50.00	2.49±0.71 ^{FGHI}
16	3.00	50.00	50.00	2.38±0.71 ^{GHI}
17	3.00	50.00	50.00	2.31±0.53 ^{GHI}
18	3.00	50.00	50.00	2.12±0.41 ^{HI}
19	3.00	50.00	50.00	2.84±0.72 ^{EPG}
20	3.00	50.00	50.00	3.04±1.19 ^{DEF}
Coefficiente de Variación (%)				22.80

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a $P < 0.05$

¥: Media ± Desviación estándar.

En el Cuadro 16 se observó que los parámetros cuadráticos teóricos de la harina de albedo de maracuyá ($P < 0.1$) y los parámetros lineales teóricos del glicerol ($P < 0.01$) presentaron valores negativos, indicando una disminución en la prueba de perforación. El R^2 es de 88.1% demostrando que los datos obtenidos para la fuerza de perforación se ajustan al

modelo, donde la falta de ajuste no fue significativa resultando el modelo superficie respuesta ser predictivo a las variables independientes significativas a una ($P>0.1$).

Cuadro 16. Coeficientes de regresión y probabilidad (p) de un modelo de regresión polinomial aplicada en la fuerza de perforación de un bioplástico.

Coeficientes	Fuerza perforación N	P
Intercepto	2.55E+00	9.34E-06
X₁	3.52E-01	1.85E-02 **
X₁²	-1.75E-01	1.28E-01 n.s
X₂	-4.62E-01	3.96E-03 *
X₂²	2.37E-01	5.75E-02 ***
X₃	3.22E-01	1.80E-02 **
X₃²	2.68E-01	3.30E-02 **
X₁×X₂	-2.20E-01	8.44E-02 ***
X₁×X₃	-1.47E-02	9.09E-01 n.s
X₂×X₃	-4.37E-01	1.57E-02 **
Falta de Ajuste		3.77E-01 n.s
R²		0.88

X₁: H maracuyá, X₂: % Glicerol, X₃ Relación M/Y

n.s = Significantes, ***= Significantes a $p<0.1$, ** = Significante a $p<0.05$, *= Significantes a $p<0.01$

La ecuación 19 se organizó en base a las variables independientes significativas a $P<0.1$ para la fuerza de deformación.

$$\text{Fuerza deformación (N)} = 2.545 + 0.351X_1 - 0.461X_2 + 0.236X_2^2 + 0.322X_3 + 0.268X_3^2 - 0.219X_1 \times X_2 - 0.436X_2 \times X_3 \quad [19]$$

En base a la ecuación 19, fueron construidos los gráficos de superficie respuesta para la fuerza de perforación, conforme a las Figuras 9, 10 y 11. Se observó en las cuales el efecto cuadrático de las variables glicerol y relación de almidón de maíz y almidón de yuca, donde la reducción de glicerol y el incremento en la relación del almidón de maíz y la disminución del almidón de yuca resulta en un incremento en la fuerza de perforación.

En la Figura 10 el incremento de las dos variables, resulta en un incremento de la fuerza de perforación y en la Figura 11 con la disminución del glicerol y un aumento de la harina de albedo de maracuyá resulta en un incremento en la fuerza de perforación.

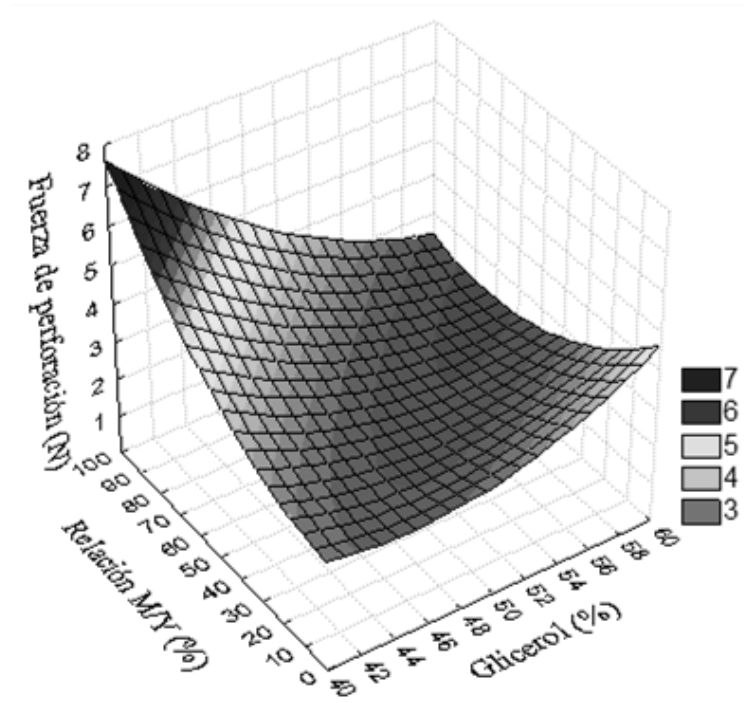


Figura 9. Efecto de las variables independientes; porcentaje de glicerol y relación M/Y, en la fuerza de perforación (N) de las películas.

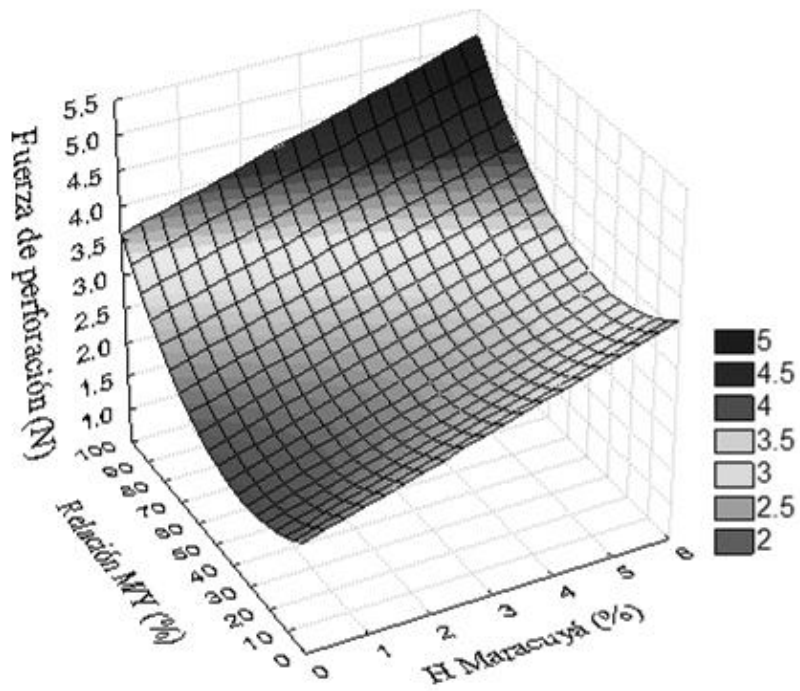


Figura 10. Efecto de las variables independientes; harina de maracuyá y relación M/Y, en la fuerza de perforación (N) de las películas.

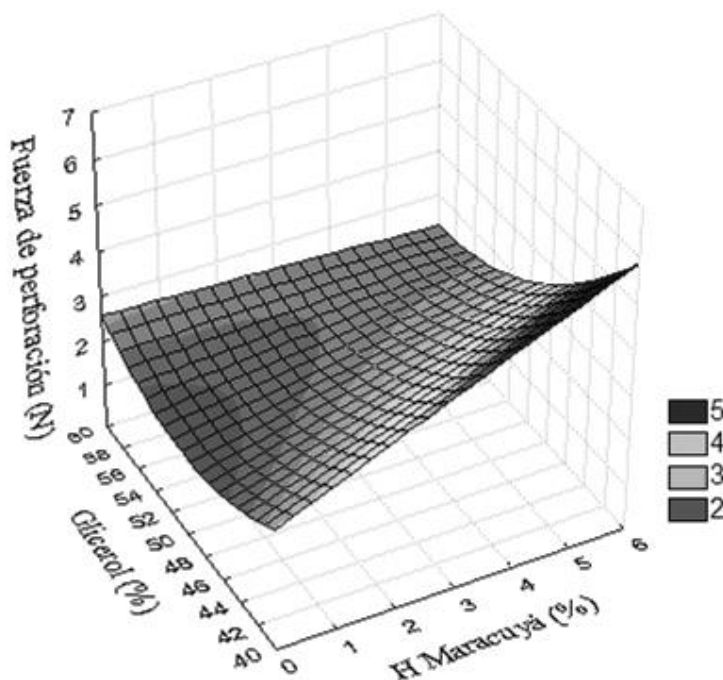


Figura 11. Efecto de las variables independientes; harina de maracuyá y glicerol, en la fuerza de perforación (N) de las películas.

De acuerdo a la Figura 10 el aumento de la concentración de glicerol de 41.6% a 58.40% provoca una reducción en la fuerza de perforación. Posiblemente hubo mayor incorporación de glicerol en las redes almidón/albedo de maracuyá, favoreciendo a la reducción de las interacciones y las ligaciones entre el almidón/harina de albedo de maracuyá disminuyendo así la fuerza de perforación del bioplástico. Resultados similares fueron observados por Rocha (2009) en bioplásticos de almidón de yuca y extracto de proteína de soja. El efecto plastificante en la reducción de la fuerza (N) de ruptura también fue observada por varios autores (Vicentini 2003, Sobral *et al.*, 1998 y Sobral, 2000).

Deformación por perforación. La deformación es un parámetro que mide la capacidad de ceder de la película sin romperse, se relaciona con la fuerza y elasticidad (Alves, 2013). En el Cuadro 17 se muestra la separación de medias, donde se encontró diferencia estadística. El tratamiento con mayor porcentaje de deformación por perforación fue el tratamiento nueve y el tratamiento que presentó un menor porcentaje de deformación por perforación fue el seis. El tratamiento nueve es el control del estudio y posee 0% de harina de albedo de maracuyá, 45% de glicerol y 50% de almidón de maíz y 50% de almidón de yuca. El tratamiento seis es el punto central del experimento para la variable harina de albedo de maracuyá y posee 3% de harina de maracuyá, 50% de glicerol, una proporción de 50% de almidón de maíz y 50% de almidón de yuca.

Cuadro 17. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en deformación por perforación.

Tratamiento	Harina de maracuyá	Glicerol	Relación almidón Maíz/Yuca	Deformación perforación
	(%)	(%)	(%)	(% ± DE) [¥]
1	1.20	45.00	25.00	42.35±4.02 ^B
2	4.20	45.00	25.00	40.41±1.20 ^{CDEF}
3	1.20	55.00	25.00	40.12±0.72 ^{CDEFG}
4	4.20	55.00	25.00	39.72±0.96 ^{DEFG}
5	1.20	45.00	75.00	40.94±1.00 ^C
6	4.20	45.00	75.00	40.46±0.72 ^{CDEF}
7	1.20	55.00	75.00	40.17±1.08 ^{CDEFG}
8	4.20	55.00	75.00	40.10±0.62 ^{CDEFG}
9	0.00	45.00	50.00	45.18±2.76 ^A
10	5.00	45.00	50.00	40.47±0.96 ^{CDE}
11	3.00	41.60	50.00	40.69±1.03 ^{CD}
12	3.00	58.40	50.00	40.64±0.85 ^{CDE}
13	3.00	50.00	8.00	39.99±0.85 ^{CDEFG}
14	3.00	50.00	92.10	40.43±0.64 ^{CDEF}
15	3.00	50.00	50.00	39.94±1.49 ^{CDEFG}
16	3.00	50.00	50.00	38.98±0.76 ^G
17	3.00	50.00	50.00	39.47±0.60 ^{DEFG}
18	3.00	50.00	50.00	39.28±0.61 ^{CDEFG}
19	3.00	50.00	50.00	39.40±0.64 ^{EFG}
20	3.00	50.00	50.00	40.00±1.41 ^{FG}
Coefficiente de Variación (%)				2.74

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a $P < 0.05$

¥: Media ± Desviación estándar.

En el Cuadro 18 se puede observar que los parámetros lineales de las variables harina de albedo de maracuyá ($P < 0.01$) y glicerol ($P < 0.05$) presentaron un efecto negativo, indicando que un aumento en la harina de albedo de maracuyá o glicerol implica una disminución en la deformación por perforación del bioplástico. Los parámetros cuadráticos de las variables harina de albedo de maracuyá y glicerol presentaron un efecto positivo lo que indica un aumento en la harina de albedo de maracuyá y glicerol en un acrecentamiento de la deformación por perforación.

Los coeficientes de regresión presentan un R^2 de 84.5% esto nos demuestra que los datos de deformación por perforación se ajustaron al modelo de superficie respuesta, pero la falta de ajuste fue significativa para la deformación por perforación por lo que este modelo clasifica como tendencioso (Thompson, 1982) (Rocha, 2009).

Cuadro 18. Coeficientes de regresión y probabilidad (p) de un modelo de regresión polinomial aplicada en deformación por perforación de un bioplástico.

Coeficientes	Deformación por perforación	P
Intercepto	3.94E+01	1.02E-11
X₁	-5.52E-01	2.79E-03 *
X₁²	7.97E-01	3.86E-04 *
X₂	-3.16E-01	1.73E-02 **
X₂²	3.43E-01	1.56E-02 **
X₃	3.18E-02	7.44E-01 n.s
X₃²	1.39E-01	1.85E-01 n.s
X₁×X₂	4.43E-01	7.12E-03 *
X₁×X₃	1.81E-01	1.92E-01 n.s
X₂×X₃	1.49E-01	2.71E-01 n.s
Falta de Ajuste		2.86E-02 **
R²		0.85

X₁: H maracuyá, X₂: % Glicerol, X₃ Relación M/Y

n.s = Significantes, ***= Significantes a p<0.1, ** = Significante a p<0.05, *= Significantes a p<0.01

La ecuación polinomial 20 se formó en base a las variables independientes con coeficientes significativos (P<0.1).

$$\text{Deformación perforación (\%)} = 39.396 - 0.551X_1 + 0.797X_1^2 - 0.316X_2 + 0.342X_2^2 + 0.442X_1 \times X_2 \quad [20]$$

En base a la ecuación 20, se construyeron los gráficos de superficie respuesta para la deformación por perforación (%), conforme a las Figuras 12 y 13. Se observa en la figura 12 el aumento de la deformación por perforación con adición de glicerol e incremento de harina de albedo de maracuyá. En el gráfico 13 con un aumento mayor a 4% de la harina de albedo de maracuyá se incrementó la deformación por perforación y de igual forma si se disminuye en una cantidad menor a 3% de harina de albedo de maracuyá se incrementa la deformación del bioplástico.

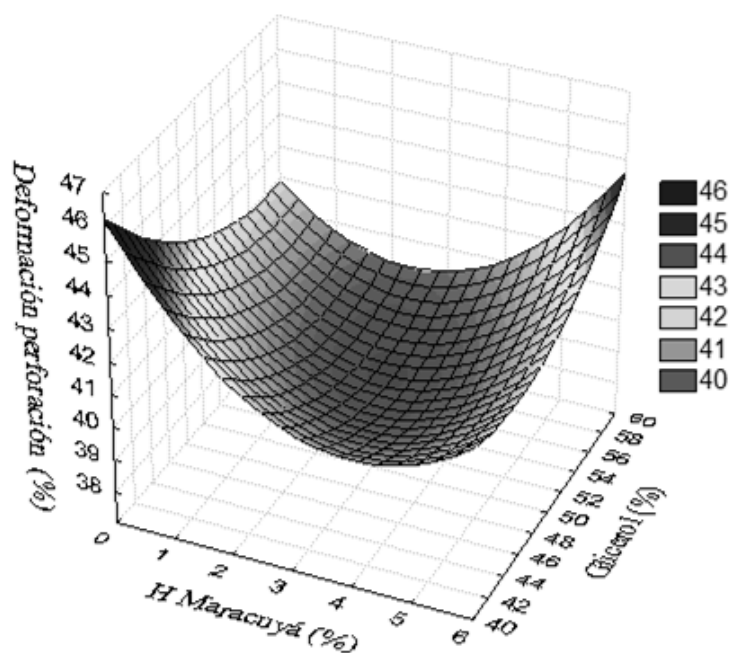


Figura 12. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y porcentaje de glicerol, en deformación por perforación (%) de las películas.

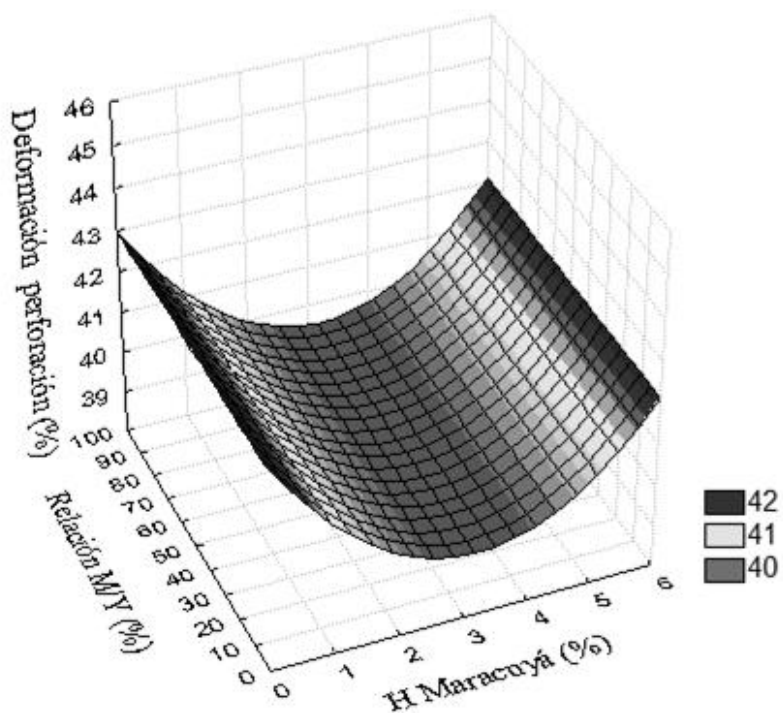


Figura 13. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y porcentaje de glicerol, en deformación por perforación (%) de las películas.

En estudio ejecutado por Alves (2013), en el cual reportó valores bajos de deformación que asume haber sido ocasionado por el tamaño de las partículas de la harina de albedo de maracuyá. Las fibras más grandes no incorporadas en la matriz del bioplástico, ocasionan una alteración de la fluidez o flexibilidad de las cadenas poliméricas y haciéndolas más débiles y más susceptibles a la ruptura.

Mendez *et al.*, (2008), reportó que el contenido de glicerol fue el factor más significativo en la deformación por perforación del bioplástico con un incremento de glicerol. A mayor cizalla que exista en la formación del bioplásticos, mejor mezcla entre la matriz de almidón/harina de albedo de maracuyá y glicerol, formando bioplásticos más flexibles (Jiménez *et al.*, 2012).

Tensión. La fuerza de tensión se refiere al máximo estrés desarrollado en una película al someterse a una prueba de elongación, mientras el valor de elongación presenta la habilidad de estirarse (Guarda y Galotto, 2001). Generalmente un incremento en la cantidad de plastificante da como resultado bioplásticos con menor fuerza de tensión y una mayor elongación, efecto observado por Choin y Han (2009) en películas de proteína de cerdo.

En el Cuadro 19, se detallan los resultados de las medias del análisis de tensión (MPa) de los 20 tratamientos que se encuentran en un rango de 2.78 hasta 7.18 MPa. El tratamiento que presentó el valor más alto de la fuerza de tensión fue el tratamiento 10, el tratamiento es un punto axial ($+\alpha$) para la variable maracuyá. El tratamiento nueve presentó el menor valor de fuerza de tensión, donde el tratamiento es un punto axial negativo ($-\alpha$) para la harina de maracuyá.

Se incrementó en 65% en la fuerza de tensión al comparar con los resultados de tensión (4.34 MPa) obtenidos por Muñoz (2014). Y en un estudio realizado por Galicia-García *et al.*, (2012) de bioplásticos a base de caña, almidón de papa y maíz donde reportó valores de 4.4 MPa.

Cuadro 19. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de maracuyá en la tensión de los tratamientos.

Tratamiento	Harina de maracuyá	Glicerol	Relación almidón Maíz/Yuca	Tensión
	(%)	(%)	(%)	(MPa ± DE) [¥]
1	1.20	45.00	25.00	4.13±0.73 ^{DE}
2	4.20	45.00	25.00	6.21±1.39 ^{AB}
3	1.20	55.00	25.00	3.47±0.98 ^{DEF}
4	4.20	55.00	25.00	3.31±0.90 ^{EF}
5	1.20	45.00	75.00	6.40±1.53 ^{AB}
6	4.20	45.00	75.00	6.18±1.08 ^B
7	1.20	55.00	75.00	3.48±0.81 ^{DEF}
8	4.20	55.00	75.00	3.73±0.80 ^{DEF}
9	0.00	45.00	50.00	2.78±0.82 ^F
10	5.00	45.00	50.00	7.18±1.45 ^A
11	3.00	41.60	50.00	6.48±1.67 ^{AB}
12	3.00	58.40	50.00	2.87±0.55 ^{EF}
13	3.00	50.00	8.00	3.99±1.17 ^{DE}
14	3.00	50.00	92.10	4.15±0.86 ^{DE}
15	3.00	50.00	50.00	4.81±1.05 ^C
16	3.00	50.00	50.00	4.24±0.88 ^{DE}
17	3.00	50.00	50.00	3.31±0.84 ^{EF}
18	3.00	50.00	50.00	3.46±1.07 ^{DEF}
19	3.00	50.00	50.00	4.32±1.34 ^D
20	3.00	50.00	50.00	6.69±1.22 ^{AB}
Coefficiente de Variación (%)				23.71

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a $P < 0.05$

¥: Media ± Desviación estándar.

Se puede observar en el Cuadro 20 que la variable independiente lineal glicerol presentó un efecto negativo, esto nos indica que al aumentar la cantidad de glicerol disminuye la fuerza de tensión. El R^2 fue de 69% lo que nos revela que los datos de tensión se ajustaron en un 69% al modelo de superficie respuesta con una $P < 0.1$, la falta de ajuste no fue significativa pero el R^2 fue mayor a 0.6 por lo que este modelo clasifica como predictivo (Thompson, 1982) (Rocha, 2009).

Cuadro 20. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en tensión de un bioplástico.

Coeficientes	Tensión MPa	P
Intercepto	4.49E+00	2.80E-04
X₁	4.72E-01	2.51E-01 n.s
X₁²	-1.49E-01	6.79E-01 n.s
X₂	-1.04E+00	2.44E-02 **
X₂²	1.21E-01	7.38E-01 n.s
X₃	2.45E-01	4.92E-01 n.s
X₃²	-6.36E-02	8.53E-01 n.s
X₁×X₂	-4.47E-01	2.73E-01 n.s
X₁×X₃	-1.89E-01	6.79E-01 n.s
X₂×X₃	-2.75E-01	5.52E-01 n.s
Falta de Ajuste		7.74E-01 n.s
R²		0.69

X₁: H maracuyá, X₂: % Glicerol, X₃ Relación M/Y

n.s = Significantes, ***= Significantes a p<0.1, ** = Significante a p<0.05, *= Significantes a p<0.01

La ecuación polinomial 21, fue compuesta seleccionando las variables independientes significativas a una P<0.1.

$$\text{Tensión (MPa)} = 4.492 - 1.035X_2 \quad [21]$$

En base a la ecuación polinomial 21 se construyó la Figura 14 de superficie respuesta con la variable lineal glicerol con efecto negativo que nos muestra que a medida que aumente la cantidad de glicerol disminuye la fuerza de tensión MPa.

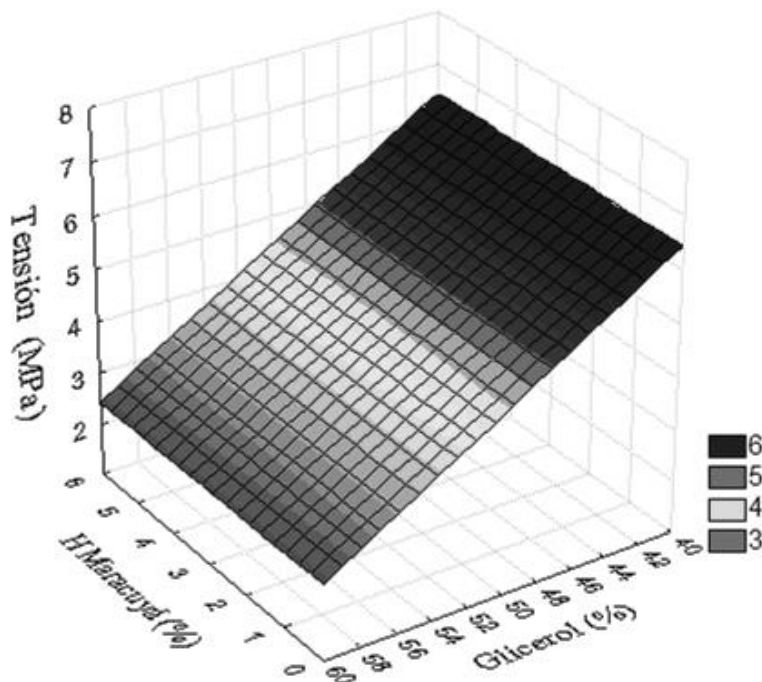


Figura 14. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y % de glicerol, en la tensión MPa del bioplástico.

De acuerdo a la Figura 14 la disminución de glicerol favorece al aumento de la tensión MPa, según Rocha (2009) las concentraciones bajas de glicerol (20-25%) favorecen a la atracción entre las cadenas macromoleculares, impidiendo así su movimiento y contribuyendo al aumento de la fuerza de tensión de las películas, a este efecto del glicerol se le conoce como antiplastificante. Resultados similares fueron reportados por Lima *et al.*, (2007) en bioplásticos de alginato puro donde la fuerza de tensión aumentó de 18 a 49 MPa con una reducción en la concentración de sorbitol 30 a 0%.

Palmu (2003), evaluó el efecto de diferentes valores de pH y las concentraciones de gluten, etanol, glicerol y gluten de trigo, donde encontró que la tensión de estiramiento disminuyó con el aumento en la concentración de glicerol. Los bioplásticos de quitosano y glicerol presentaron una disminución en la tensión de estiramiento alrededor del 65% (Ziani *et al.*, 2008).

Deformación. La deformación por elongación es una relación entre la elongación de la muestra la ruptura y su longitud inicial (Sarantópoulos, 2002). En el Cuadro 21 se presentan los resultados del análisis de deformación por elongación, el tratamiento con mayor porcentaje de deformación 27% fue el 10 este posee 5% de harina de albedo de maracuyá, 45% de glicerol, 50% de almidón de maíz y 50% de almidón de yuca este tratamiento es un punto axial positivo ($+\alpha$) de la variable harina de albedo de maracuyá. Y el tratamiento 17 presentó un menor porcentaje de deformación 11.7% este tratamiento es una repetición del punto central de la variable harina de albedo de maracuyá.

Cuadro 21. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de maracuyá en la deformación por elongación del bioplástico.

Tratamiento	Harina de maracuyá	Glicerol	Relación almidón Maíz/Yuca	Deformación
	(%)	(%)	(%)	(% ± DE)
1	1.20	45.00	25.00	14.85±3.15 ^{JK}
2	4.20	45.00	25.00	22.87± 4.25 ^B
3	1.20	55.00	25.00	18.16±3.40 ^{DEFGHI}
4	4.20	55.00	25.00	12.65± 4.03 ^{JK}
5	1.20	45.00	75.00	21.93± 4.62 ^{BC}
6	4.20	45.00	75.00	21.27±4.39 ^{BCD}
7	1.20	55.00	75.00	15.09± 3.86 ^{IJ}
8	4.20	55.00	75.00	20.96± 2.89 ^{BCDE}
9	0.00	45.00	50.00	21.52± 4.45 ^{BCD}
10	5.00	45.00	50.00	27.05± 6.23 ^A
11	3.00	41.60	50.00	21.87± 3.41 ^{BC}
12	3.00	58.40	50.00	19.08±4.98 ^{CDEFG}
13	3.00	50.00	8.00	15.84± 3.73 ^{GHIJ}
14	3.00	50.00	92.10	18.62±4.07 ^{CDEFGH}
15	3.00	50.00	50.00	15.46± 3.56 ^{HIJ}
16	3.00	50.00	50.00	17.68± 3.60 ^{EFGHI}
17	3.00	50.00	50.00	11.700± 3.10 ^K
18	3.00	50.00	50.00	17.36± 3.66 ^{FGHI}
19	3.00	50.00	50.00	13.37± 4.37 ^{JK}
20	3.00	50.00	50.00	19.29±4.79 ^{CDEF}
Coefficiente de Variación (%)				22.52

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a $P < 0.05$

¥: Media ± Desviación estándar.

De acuerdo al Cuadro 22 los parámetros cuadráticos y lineales de las variables glicerol, relación de almidones presentan un signo positivo lo que nos indica que un incremento de estas variables que fueron significativas $P < 0.1$, resulta en el incrementó de la deformación. El R^2 determina que los datos se ajustaron en un 64% al modelo de superficie respuesta y 36% de los datos no se adaptaron al modelo, posiblemente se debe al error experimental. La falta de ajuste no fue significativa a una $P < 0.1$ para deformación por tensión, dando lugar a un modelo con carácter predictivo.

Cuadro 22. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada en deformación por tensión de un bioplástico.

Coeficientes	Deformación %	P
Intercepto	1.57E+01	4.06E-05
X₁	4.92E-01	5.88E-01 n.s
X₁²	1.63E+00	9.63E-02 ***
X₂	-1.02E+00	2.37E-01 n.s
X₂²	1.31E+00	1.63E-01 n.s
X₃	1.71E+00	7.80E-02 ***
X₃³	-3.69E-02	9.63E-01 n.s
X₁×X₂	-4.03E-01	6.56E-01 n.s
X₁×X₃	1.34E+00	2.43E-01 n.s
X₂× X₃	-1.03E+00	3.54E-01 n.s
Falta de Ajuste		3.60E-01 n.s
R²		0.644

X₁: H maracuyá, X₂: % Glicerol, X₃ Relación M/Y

n.s = Significantes, ***= Significantes a p<0.1, ** = Significante a p<0.05, *= Significantes a p<0.01

De acuerdo con los valores independientes seleccionados por medio de su significancia se generó la ecuación polinomial 22.

$$\text{Deformación por tensión (\%)} = 15.714 + 1.631X_1^2 + 1.713X_3 \quad [22]$$

En base a la ecuación 22, se establecieron las figuras de superficie respuesta para la deformación por tensión, conforme a las Figuras 15 y 16. Se observó en la Figura 15 que al incrementar la cantidad de harina de albedo de maracuyá provoca un incremento en el porcentaje de deformación por tensión. En la Figura 16 el incremento del porcentaje de deformación esta ligado al aumento en la relación de almidón de maíz con respecto al de yuca. El contenido de amilosa del almidón afecte al porcentaje de deformación ya que ésta forma bioplásticos más firmes debido a la orientación paralela de las cadenas macromoleculares que le permite formar enlaces de hidrogeno entre grupos hidroxilos de polimeros adyacentes.

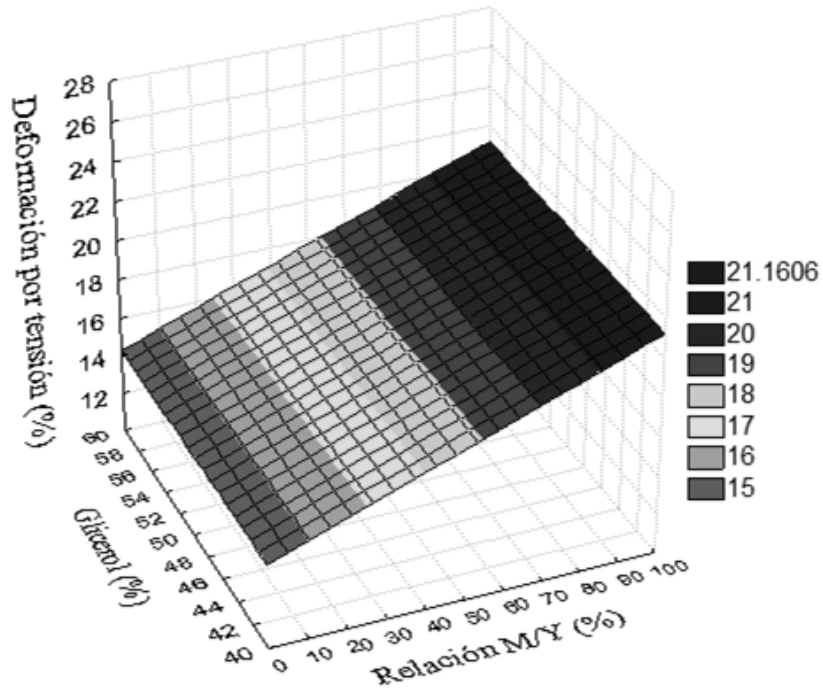


Figura 15. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de maracuyá y relación almidón de maíz-yuca, en deformación por tensión % del bioplástico

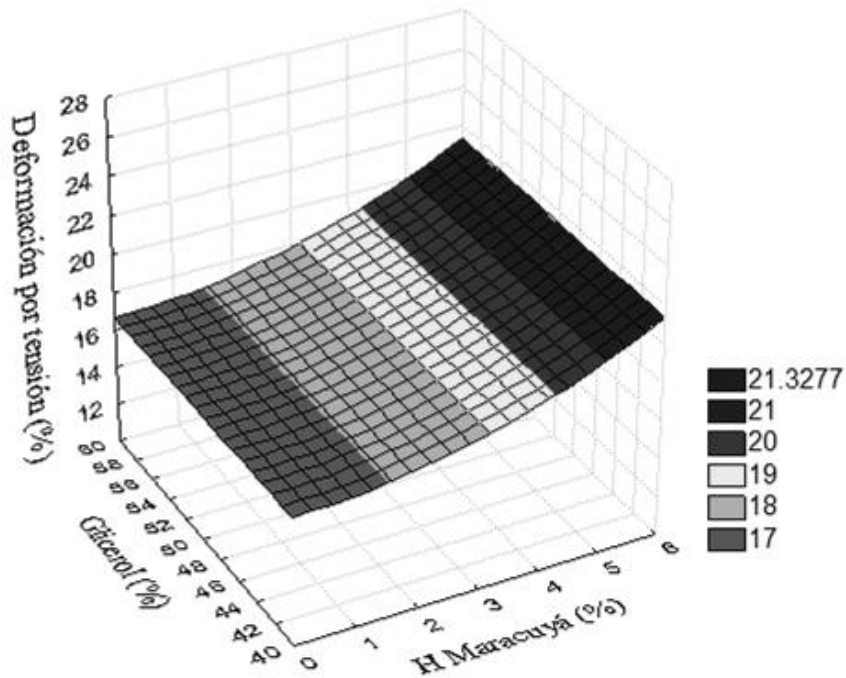


Figura 16. Efecto de las variables independientes; contenido de harina de albedo de maracuyá y relación almidón de maíz-yuca, en deformación por tensión % del bioplástico

En estudio realizado por Alves (2013), en la elaboración de bioplásticos reforzados con harina de cascara de albedo de maracuyá por el método de extrusión termoplástica reportó que a mayor cantidad de harina de cascara de maracuyá se redujo el porcentaje de deformación por tensión, asume que este comportamiento se debe al alto contenido de fibra tanto soluble como insoluble que mejora las propiedades de resistencia a la tensión (aumento), pero perjudica la deformación del bioplástico.

En este estudio la variable glicerol no presentó algún efecto en el porcentaje de deformación por tensión, en estudio realizado por Rocha (2009); otros autores reportaron que el glicerol tiene un comportamiento lineal positivo, lo que nos indica que al aumentar la cantidad de glicerol aumenta el porcentaje de deformación.

En estudio realizado por Muñoz (2014) en bioplásticos de glicerol y una combinación de almidón de maíz/yuca reportó valores de deformación de 30 a 70%, donde el tratamiento con mayor porcentaje de deformación poseía 60% de glicerol y una relación de 25:75 de almidón de maíz/yuca y el tratamiento con menor porcentaje de deformación tiene 35% de glicerol.

En comparación con el bioplástico elaborado por Muñoz (2014) a base de una relación de almidón de maíz, yuca y glicerol se redujo en un 51.79% la deformación por tensión al incorporar a la matriz la harina de albedo de maracuyá.

Módulo de elasticidad. Es considerado uno de los indicadores de rigidez de las películas biodegradables y cuando más alto el módulo más rígido el material (Oliveira *et al.*, 1996). Mano y Mendes (1999) definen el módulo de elasticidad como la razón entre la tensión y la deformación dentro del límite elástico, en el que la deformación es totalmente proporcional a la tensión.

En el Cuadro 23 se presentan los resultados del análisis del módulo de elasticidad, donde se obtuvo valores desde 0.64 hasta 2.23 MPa. El tratamiento con mayor módulo de elasticidad fue el 14, éste tratamiento posee 3% de harina de maracuyá, 50% de glicerol y 92.1% de almidón de maíz y 7.9% de almidón de yuca. Este tratamiento es un punto axial positivo (+ α) de la relación de almidones y punto central de la harina de maracuyá. El tratamiento 18 fue el que menor módulo de elasticidad presento, es una repetición del punto central de las tres variables del estudio.

Cuadro 23. Efecto de la combinación de almidón de maíz/yuca, glicerol y harina de albedo de maracuyá en el módulo de elasticidad.

Tratamiento	Harina de maracuyá	Glicerol	Relación almidón Maíz/Yuca	Módulo de elasticidad
	(%)	(%)	(%)	(MPa ± DE)
1	1.20	45.00	25.00	1.18±0.20 ^{CDEF}
2	4.20	45.00	25.00	1.58±0.38 ^{BC}
3	1.20	55.00	25.00	0.89±0.27 ^{EF}
4	4.20	55.00	25.00	0.70±0.23 ^F
5	1.200	45.00	75.00	1.44±0.71 ^{BCDE}
6	4.20	45.00	75.00	1.09±0.20 ^{CDEF}
7	1.20	55.00	75.00	0.83±0.18 ^{EF}
8	4.20	55.00	75.00	0.79±0.22 ^F
9	0.00	45.00	50.00	0.80±0.30 ^F
10	5.00	45.00	50.00	1.94±0.45 ^{AB}
11	3.00	41.60	50.00	1.16±0.26 ^{CDEF}
12	3.00	58.40	50.00	0.77±0.18 ^F
13	3.00	50.00	8.00	0.91±0.22 ^{EF}
14	3.00	50.00	92.10	2.23±2.79 ^A
15	3.00	50.00	50.00	0.84±0.24 ^{EF}
16	3.00	50.00	50.00	0.99±0.26 ^{CDEF}
17	3.00	50.00	50.00	0.96±0.20 ^{DEF}
18	3.00	50.00	50.00	0.64±0.20 ^F
19	3.00	50.00	50.00	0.86±0.51 ^{EF}
20	3.00	50.00	50.00	1.56±0.58 ^{BCD}
Coefficiente de Variación (%)				33.89

Valores seguidos por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes a $P < 0.05$

∓: Media ± Desviación estándar.

En el Cuadro 24, se observó que el glicerol presentó un efecto cuadrático positivo, mostrando que al incrementar la cantidad de glicerol en la formulación para la elaboración del bioplástico se incrementa el módulo de elasticidad. El R^2 nos indica que el 69% de los datos del análisis del módulo de elasticidad se ajustaron al modelo de superficie respuesta la falta de ajuste no fue significativa a $P < 0.1$, indicando que este modelo matemático es de carácter predictivo (Thompson, 1982) (Rocha, 2009).

Cuadro 24. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicada al módulo de elasticidad de un bioplástico.

Coeficientes	Módulo de elasticidad	P
Intercepto	9.00E-01	1.53E-04
X₁	6.13E-02	3.83E-01 n.s
X₁²	9.09E-02	1.91E-01 n.s
X₂	-1.86E-01	2.32E-02 **
X₂²	1.37E-02	8.30E-01 n.s
X₃	2.50E-02	6.86E-01 n.s
X₃²	4.90E-02	4.33E-01 n.s
X₁×X₂	-1.33E-01	9.30E-02 ***
X₁×X₃	-6.14E-02	4.58E-01 n.s
X₂×X₃	2.86E-02	7.23E-01 n.s
Falta de Ajuste		3.75E-01 n.s
R²		0.69

X₁: H maracuyá, X₂: % Glicerol, X₃ Relación M/Y

n.s = Significantes, ***= Significantes a p<0.1, ** = Significante a p<0.05, *= Significantes a p<0.01

La ecuación polinomial 22 fue generada con las variables independientes que fueron significativas a P<0.1.

$$\text{Módulo de elasticidad (MPa)} = 0.900 - 0.185X_2 - 0.132X_1 \times X_2 \quad [22]$$

La Figura 17 fue generada en base a la ecuación polinomial 22, para el módulo de elasticidad. Se observó que la disminución de glicerol provoca un aumento en el módulo de elasticidad, resultados similares fueron observados por Rocha (2009) en bioplásticos de extracto de soja y almidón de yuca donde la interacción de glicerol y pH demostraron que la combinación de valores de pH ácidos y cantidades mayores de glicerol disminuyen el módulo de elasticidad del bioplástico. La variable que más afectó al módulo de elasticidad fue el glicerol, la variable relación de almidones y harina de albedo de maracuyá no presentaron efecto en el módulo de elasticidad del bioplástico.

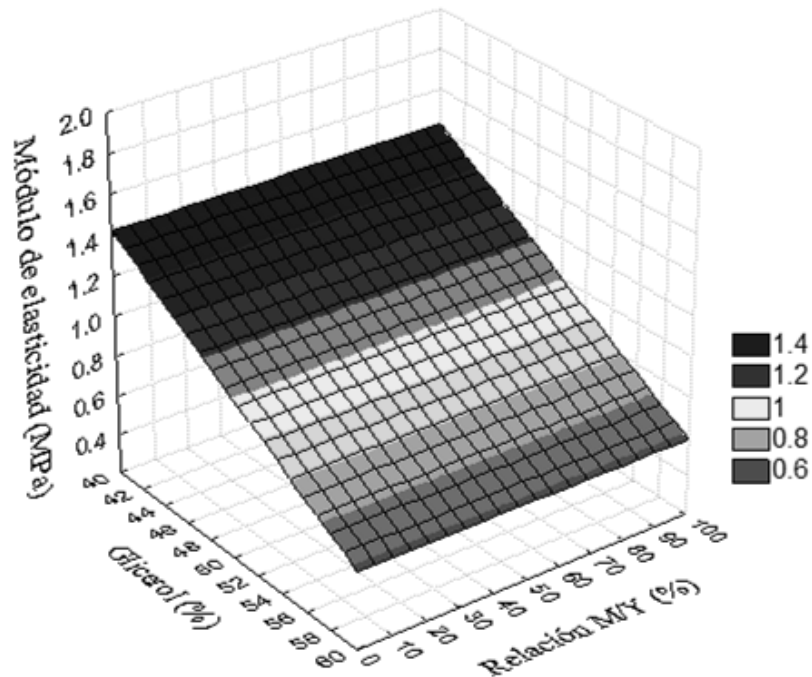


Figura 17. Efecto de las variables independientes; % de glicerol y relación almidón de maíz-yuca, en módulo de elasticidad MPa del bioplástico.

Se observó en la Figura 14 que a medida que el glicerol aumenta, disminuye el módulo de elasticidad, efecto similar fue observado por Lima, *et al.*, (2007). Estos autores observaron que al incrementar el sorbitol en 30%, se redujo las interacciones entre las moléculas del almidón y glicerol en la matriz, aumentando el volumen libre entre las cadenas, provocando una disminución del módulo de elasticidad.

Zhang *et al.*, (2001), observaron un efecto antiplastificante en el módulo de elasticidad que a bajos contenidos (10 a 20%) de glicerol el módulo de elasticidad fue alto y cuando el contenido de glicerol aumentaba a más del 30% el módulo de elasticidad decrecía significativamente en bioplásticos de proteína de soja.

Degradación. La norma ASTM D 5488-944 define la biogradabilidad como la capacidad de degradación de un material por acción enzimática y de microorganismos (Meneses, *et al.*, 2007). Los parámetros que se deben tener en cuenta son el tiempo y las condiciones en las que se lleva a cabo la degradación. Para considerar que un material es biodegradable en un medio húmedo tiene que degradarse entre 28 y 60 días o en un medio seco cuando se degrada en 90 días (Cruz 2014).

Se requiere de varios factores para que se lleve a cabo la descomposición de un material como presencia de microorganismos, aire, radiación UV, humedad, temperatura. En el Cuadro 25 se describe la composición del suelo utilizado para medir degradación del bioplástico a base de harina de albedo de maracuyá, donde presentó una textura franco arcilloso el cual está compuesto por un 38 % de arena, 34% de limo y un 28% de arcilla. La

composición del suelo afecta la tasa de descomposición del material a descomponer (Gober, sf).

El suelo presentó un pH de 7,96 que se encuentra en el rango adecuado cinco a ocho pH para llevar a cabo la degradación del bioplástico valores reportados por De Fuentes (2014). Un contenido de materia orgánica de 3,83, nitrógeno total 0.19, relación C/N de 3.03 y un contenido de humedad del 4.2 %.

Cuadro 25. Caracterización del suelo utilizado para el análisis de degradación del bioplástico.

Textura			pH	Materia orgánica	N total	Relación C/N	Humedad %
Franco Arcilloso			7,96	3,83	0.19	3.03	4.2
Arena	Limo	Arcilla		Medio	Bajo		
38	34	28					

En el Cuadro 26 se detalla los datos climáticos del lugar donde se llevó a cabo el análisis de degradación, temperatura, porcentaje de humedad, precipitación e índice de UV. La temperatura y humedad ayudan a crear un ambiente adecuado para que los microorganismos puedan llevar a cabo la descomposición del material.

Cuadro 26. Datos climáticos de Zamorano, Francisco Morazán.

Días	Temperatura °C	Humedad %	Precipitación	Índices UV
3	24.69	68.60	0.00	2.84
6	25.52	62.45	0.00	2.69
9	25.43	66.68	0.00	2.53
12	25.31	70.35	1.48	2.73
15	25.69	68.35	0.00	2.64

Para la cuantificación de la degradación se siguió la variación de la morfología y la cuantificación del área del bioplástico. Este análisis se realizó a los tratamientos que poseían los puntos axiales (- α , + α) de la harina de albedo de maracuyá, glicerol y relación almidón de maíz/yuca.

En el Cuadro 27 se muestran los porcentajes del área degradada de los tratamientos, el mayor porcentaje de degradación fue al día tres para el tratamiento 12 y el tratamiento 14, al día tres fue el que menos degradación presentó. Lo que diferencia a estos tratamientos es el contenido de glicerol ya que determina la capacidad de absorción de agua del bioplástico creando así un ambiente adecuado para la degradación del bioplástico. La degradación del segundo bloque presentó un menor porcentaje de descomposición del bioplástico al día sexto que el primer bloque que fue evaluado al tercer día. Esta diferencia en la degradación de las películas en los diferentes días se debe a la diferencia de la humedad, temperatura,

(Cuadro 26), las diversas poblaciones de microorganismos y el tipo de tierra afecta a la descomposición del material (López *et al.*, 2010).

Los suelos con un alto contenido de arcilla presentan niveles bajos de porosidad y oxígeno dando lugar a una disminución de la actividad microbiana. Un suelo con alto contenido de arena son porosos y tienen niveles de humedad y temperatura muy fluctuantes lo que afecta adversamente la actividad microbiana (Gober, *sf*).

Estudio realizado por (López *et al.*, 2010), demostraron que la velocidad de degradación se ve ligeramente disminuida por la presencia del plastificante (glicerol), donde considera que el glicerol disuelve las moléculas del bioplástico, dando mayor estabilidad a las redes poliméricas. Hipotéticamente se asume que el lugar donde se enteraron los tratamientos para ser analizados al día tres, tenía un menor contenido de arcilla y lino así logrando una mayor área de contacto con el bioplástico.

Cuadro 27. Cuantificación del área no degradada del bioplástico de harina de maracuyá.
























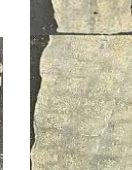
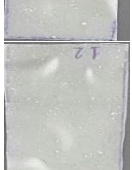





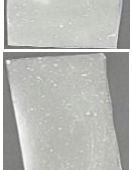





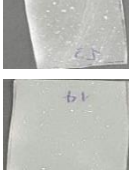

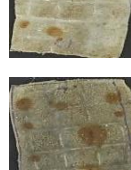



TRT/Días		0	3	6	9	12	15
1	Área (cm) ^α	13.40	8.54	12.70	12.71	12.93	11.82
	Área (%) ^β	0.00	34.95	3.35	1.53	1.53	9.91
9	Área (cm) ^α	12.96	11.67	12.03	12.06	12.82	11.32
	Área (%) ^β	0.00	9.94	7.21	1.19	1.04	12.61
10	Área(cm) ^α	13.18	10.23	11.83	10.61	11.15	7.05
	Área (%) ^β	0.00	22.37	10.22	19.47	15.41	46.51
11	Área(cm) ^α	13.85	9.24	12.82	12.40	12.58	13.88
	Área (%) ^β	0.00	33.30	7.40	10.45	9.16	13.88
12	Área(cm) ^α	14.21	8.10	13.24	13.14	11.13	12.10
	Área (%) ^β	0.00	43.02	6.83	7.56	21.72	14.90
13	Área(cm) ^α	13.66	9.08	11.07	13.08	13.12	10.85
	Área (%) ^β	0.00	33.51	18.98	4.28	3.98	20.60
14	Área(cm) ^α	13.22	12.89	13.09	12.25	12.99	12.17
	Área (%) ^β	0.00	2.52	0.96	7.33	1.76	7.94

α: Área no degradada en centímetros,

β: porcentaje del área degradada

En el cuadro 28 se muestran las imágenes de degradación, donde se puede observar que al día tres presentó un mayor porcentaje de degradación el bioplástico. Y el tratamiento 14 fue el que menor porcentaje de degradación presentó durante los quince días, este tratamiento posee 3% de harina de maracuyá, 50% de glicerol y una relación 92.1:7.9 de almidón de maíz/ yuca.

Cuadro 28. Muestra de la apariencia de las películas degradadas a base de harina de albedo de maracuyá en condiciones ambientales.

Tratamiento	Día 0	Día 3	Día 6	Día 9	Día 12	Día 15
1						
9						
10						
11						
12						
13						
14						

Función de utilidad. En la figura 18 se muestran los valores óptimos de las variables independientes sobre las diferentes respuestas. Bajo las restricciones de un baja espesura, solubilidad en agua, diferencia de color, opacidad, módulo de elasticidad, permeabilidad al vapor de agua, tensión, fuerza de perforación y deformación por perforación se determinó un 2.83 % de harina de albedo de maracuyá, una proporción de 50:50 de almidón de maíz/yuca y 49.50% de glicerol.

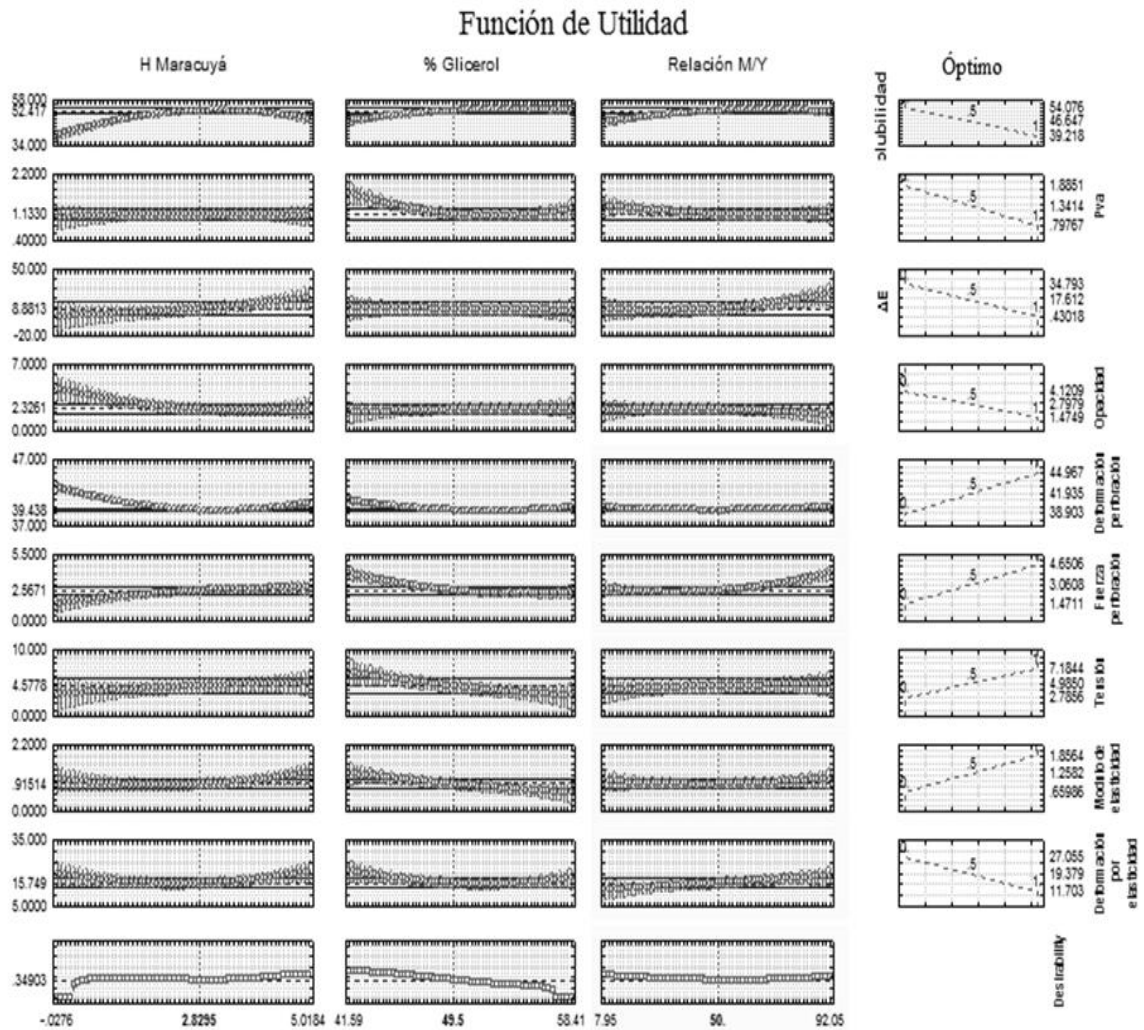


Figura 18. Valores óptimos de las variables independientes sobre las propiedades físicas y de barrera de un bioplástico de harina de albedo de maracuyá.

4. CONCLUSIONES

- Se determinó que la combinación de 2.83% de harina de albedo de maracuyá, una proporción de 50:50 almidón de maíz/yuca y 49.5% de glicerol, optimizan todas las variables físicas y de barrera del bioplástico.
- La incorporación a la matriz del bioplástico de la harina de albedo de maracuyá mejoró las propiedades mecánicas y empeoró las propiedades de barrera.
- Se elaboraron siete modelos matemáticos con carácter predictivo y dos modelos matemáticos con carácter tendencioso.

5. RECOMENDACIONES

- Incorporar a la matriz del bioplástico un saborizante, colorante o antocianinas.
- Evaluar la degradación del bioplástico en un suelo que tenga una mejor textura.
- Utilizar una harina de albedo de maracuyá con un tamaño de partículas menor a 271 μm o que clasifique como harina.
- Estudiar el comportamiento reológico de la solución filmogénica.
- Incorporar en la matriz del bioplástico una fuente de fibra y lípidos para mejorar las propiedades reológicas y de barrera

6. LITERATURA CITADA

Alcántara, C. sf. Diferencias colorimétricas de los colores base Pantone con barnices de sobreimpresión en la industria gráfica. Consultado el 27 de septiembre del 2015. Disponible en: <http://es.slideshare.net/CarlosAlcantara/ccolorimetria>

Alvarado, L. 2009. Obtención de harina de yuca para el desarrollo de productos dulces destinados para la alimentación de celíacos. Tesis Ing. En Alimentos. Guayaquil, Ecuador, Escuela Superior Politécnica del Litoral. 40 p.

Alves, T. 2013. Caracterización física y química de bioplásticos elaborados por extrusión termoplástica reforzados con cascara de maracuyá. Tesis PhD. Tecnología de alimentos. Brasil, Universidad de Rio de Janeiro.

Baos, S. (sf). Bioplásticos nuevas tecnologías en el envasado de alimentos. Asociación de empresarios del henares , 10- 11 p.

Batista, J., P. S., Tanada, C. R. F., Grosso. 2005. Efeito da adicao de acidos graxos en filmes a base de pectina. Ciencia E Tecnologia de Alimentos, 80, 972-978 p.

Bayer, E. A., Lamed, R. 1992. the cellulose paradox: pollutant par excellence and/or a reclaimable natural resource. Biodegradation, 3(2-3):171-188.

Box, G., Draper, N. 1967. Empirical model- building with response surface, a book de published.

Box, *et al.* 1978. Statistics for experimenters: An introduction to desing, data and model building, New York: John Wiley y Sons.

Centro de Tecnología de Embalagenes (CETEA).1996. Ensaio para avaliacao de embalagens plásticas flexiveis. Campinas. 219 p.

CAO, 2007. Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films. Food Hydrocolloids v. 21. 1153-1662 p

Cho, S., Rhee, C. 2004. Mechanical properties and water vapor permeability of edible films made from fractionated soy proteins with ultrafiltration. Lebensmittel- Wissenschaft Und- Technologie, V. 37, N. 8. 833-839 p.

Choi, W., Han, J. 2001. Physical and mechanicl properties of pea-protein based edible flims. Journal of Food Science. 6(2):319-322.

Crippa, A. 2006. Estudo do desempenho de films multicamadas em embalagens termoformadas. Tes de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Curitiba, Brasil, Universidad Federal do Paraná, 136 p.

Cruz, C. 2014. Bioplástico para embalaje. Tesis Ing. Química. Veracruz, México, Universidad Veracruzana. 8 p.

Davanco, T., Tabada-palmu, P., Grosso. C. 2007. Filmes compostos de gelatina, triacetina, ácido esteárico ou capríco: efeito do pH e da adição de surfactantes sobre a funcionalidade dos filmes. *Critical Reviews in Food Science*, 38(4): 299-313.

De Fuentes, A. 2014. Nuevos biomateriales y su tratamiento como biorresiduo. *Ecoembes Medio Ambiente*. 11 p.

Espitia, P.J.P, Soares, N. F.F. Bottil, L.C.M., Silva W..A. 2011. Effect of essential oil in the properties of cellulosic active packaging. 199 - 205 p.

Ferreira, A. 1986. Novo Dicionario de Lingua Portuguesa, 2ª Ed. 35ª Impressão, Editora nova Fronteira.

Filey. P., Monahan, F. J., Krochta, J. M. 1996. Mechanical properties and water permeability of edible films from whey protein isolate and sodium dodecyl sulfate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v44, n2, 438-443 p.

Fowler, P. A. J. M., Hughes., Elias, R. M. 2006. Biocomposites technology, environmental credentials and market forces. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 86. p 1781-1789.

Galicia Garcia, T. G., Martinez Bustos, A., O., Jimenez Arevalo, D., Arencó, J., Games Perez y Martinez, A. B. 2012. Films of native and modified starch reinforced with fiber: influence of some extrusion variables using response surface methodology. *Journal of Applied Polymer Science*, v 126, 326-335.

Gober, J. sf. Factores que influyen en la tasa de descomposición de materia orgánica en el suelo.

Gomez, M. Aguilera, J. 1984. A physicochemical model for extrusion corn starch. *J Food Sci*. 40-43 p.

Gontard, N. 1991. Films des enrobages comestibles: étude d'amélioration des propriétés filmogènes du gluten. Tese Doctorat Biochimie, Biologie, Cellulaire et Moléculaire/ Sciences Des Aliments), Université Des Sciences Et Techniques Du Languedoc, Montpellier. 174 p.

Gontard, N., Guilbert, S., Cuq, J. 1993. Water and glycerol as plasticizers effect mechanical and water vapour barrier properties of an edible wheat gluten film. *Journal of Food Science*, V. 58, N. 1, P. 206-211 p.

Guan, J., et. al. 2004. *Cereal Chem*. 81 (2). 199-2006.

Guarad, G., Galotto, M. G. 2001. Propiedades físicas de materiales plásticos. 285 p.

Jiménez, A. Fabra, M. J., Talens, P., Chiralt, A. 2012. Effect of re-crystallization tensile, optical and water vapour barrier properties of corn starch films containing fatty acids. *Food Hydrocolloids*, 26(2): 302-310.

Kaewtatip, K., Thongmee, J. 2012. Studies on the structure and properties at thermoplastic starch/lutta fiber composites. 40. 314-318.

Kristo, E., Biliaderis, C. G. 2007. Physical properties of starch nanocrystal-reinforced pullulan films. Carbohydrate Polymers, v. 68, 146-158 p.

Kunte, L. A., GEnnadios, A., Cuppett, S. L., Hanna, M. A., Weller, C. L. 1997. Cast films from soy protein islates and fractions. Ceral Chenistry, v74, n2, 115.118.

Lee, M. Hettiarachy N, McNew, R y Gnanasambandam, R. 1999. Physicochemical properties of calcium-fortified rice. Cereal CHEmistry 72. 4. 352-355 p.

Lima, A. M. F., Andreani, L., Soldi, V. 2007. Influencia da adicao de plastificante e do proceso de reticulacao na morfología, Absorcao de agua e propiedades mecánicas de filmes de alginato de sódio. Quimica Nova, 30(4):832-837

López, A., Rivas, J., Loaiza, M., Sabino, M. 2010. Degradación de películas plastificadas de quitosano obtenidas a partir de conchas de camarón (*L. vannamei*). Revista de la Facultad de Ingeniería de Venezuela, 25(2).

Luna, G. 2009. Almidón termoplástico de yuca reforzado con fibra de fique.

Mali, S., Grossmann, M. V. E., García, M. A., Martino, M. M.Zaritzky, N.E. 2004. Barrier, mechanical and optical properties of plasticized yam starch films. Carbohydrate Polymers, v.56, p 219-135.

Mano, E., Mendes, L. 1999. Avalicao das propiedades dos polímeros. In: introducao A polímeros. Editoria Edgard Blucher Ltda. Sao Paulo, Brasil. 58-64 P.

Mchugh, T. H., Krochta, J. M. 1994. Sorbitol vs. glycerol-plasticized why protein edible films: integrated oxygen permeability and tensile perperty evaluatin. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 42, 841-845.

Meneses *et. al.* Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. Tesis Ing. Agroindustrial. México, universidad Autónoma del Estado de México. 148 p.

Meneses, J., Corrales, C., Valencia, M. 2007. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca. EIA, 8, 61p.

Munive, P. 2009. Elaboración de un suplemento alimenticio en polvo para consumo humano a partir de una mezcla de hidrolizado de soya y almidón de maíz. Tesis Ing. Agroindustrial. Quito, Ecuador, Escuela Politécnica Nacional. 53 p.

Muñoz, J. 2014. Evaluación, caracterización y optimización de un bioplástico a partir de la combinación de almidón de maíz, yuca y glicerol en sus propiedades físicas y de barrera. Tesis Ina. Agroindustria Aimentaria, Teguciglapa, El Zamorano, Escuela Agrícola Panamericana. 30 p.

Narváez, E. 2012. Estudio de la consistencia y la estabilidad en refrigeración del almidón gelatinizado de camote (*Ipomoea batatas* L.), utilizado como espesante en mezclas con otros ingredientes. Tesis Ing. Agroindustrial. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. 29 p.

Oliveira, L., et al. 1996. Ensaios para avaliaco de embajagens plasticas flexiveis. Campinas. Centro de Tecnologia de Embalagem (CTEA), 219 P.

Palazuelos, E. *eta* al. 2006. Caracterización estructural de compósito biodegradables elaborados a partir de mezcla de almidón de maíz y fibra de caña utilizando el proceso de inyección- moldeado. Universidad Autónoma de Sinaloa. 20 p.

Palmu, P. S. T. 2003. Preparacao, propriedades e aplicacao de biofilmes comestiveis a base de gluten de trigo. Tese Dootorado do Facultad de Engenharia Campinas, Brasil, Universidad Estadual de Campinas.

Petrikoski, A. 2013. Elaborcao de biofilmes de fécula de mandioca e avalicao do seu uso na imobilizacao de caulinita intercalada com ureia. Teis Pos-Graduaco en Tecnologia. Quimicos e Bioquimicos, Pato Branco, Brasil, Universidad Tecnologica Dereal do Paraná. 71 p.

Quintero, D., Rmírez, J. 2013. Estudio del mecanismo de gelatinización del almidón de yuca. 7- 8 p.

Rocha, G. O. 2009. Obtencao e caracterizao de films biodegradáveis a partir de misturas de amido de amndioca e extrato protéico de soja. Tesis, Programa de pos-graduación en Ciencias e Tecnologia de Alimentos, Rio de Janeiro, Brasil, Uiversidad Federal Rural do Rio de Janeiro, 45 p

Sarantópoulos, C. L., Oliveira, M., Padula, L., Coltro, R., Alves y García, E. 2002. Embalagens plásticas flexiveis. Principais polímeros e avaliacao de propiedades. 267 p.

Sobral, P. J. A., Ocuno, D., Savastano Junior, H. 1998. Preparo de proteínas miofibrilares de carne e elaboracao de biofilmes con dois tipos de ácidos; propiedades mecánicas. Braz. J. Food Technol, 1(1-2), 44-52

Sobral, P. 1999. Propiedades funcionales de biofilmes de gelatina em funcao da espessura. Ciencia y Engenharia. Uberlandia, v.8,n. 1. 60-67 p

Sobral, P. J. 2000. Influencia da espessura de biofilms a base de proteínas miofibrilasres sobre suas propiedades funcionáis. Pesquisa Agropecuria Brasileira, Brasilia, 35(6):1251-1259.

Sobral, P. J. A., Garcia, F. T.Habitante, A. M., Monterry-Quintero, E. S. 2004. Propiedades de filmes comestiveis produzidos com diferentes concentracoes de plastificantes e de proteínas do músculo de tilapia do nilo. Pesq. Agropec Bras, Brasilia, 39(3):255-262.

S.M.A. 2008. “Norma Ambiental Estatal NAE.SEMADES.007/2008. Criterios y especificaciones técnicas bajo las cuales se deberá realizar la separación, clasificación y valorización de los residuos en el estado de Jalisco”. Secretaria de medio ambiente, México.

Shiku, Y., Hamaguchi, S., Benjakul, W., Tanaka. M. 2004. Effect of surimi quality on properties of edible films based on Alaska Pollack. Food Chemistry, V. 86. N. 4. 493-499 p.

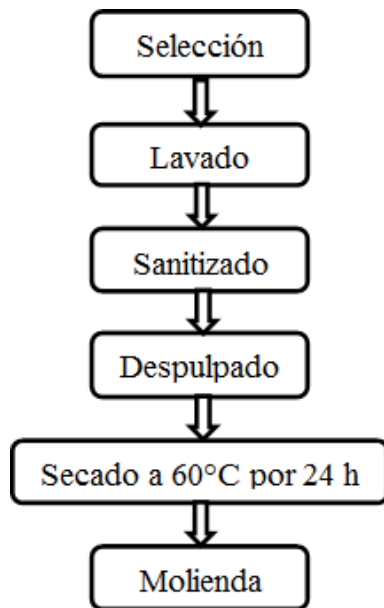
Soto, J., Candelas, M. sf. Isoterma de sorción a diferentes temperaturas para el higo variedad misión. Durango, México.

Sperling L.H. Introduction to Physical polymer science. 3 er ed; jOhn wiley & sons, Canada, 2006.

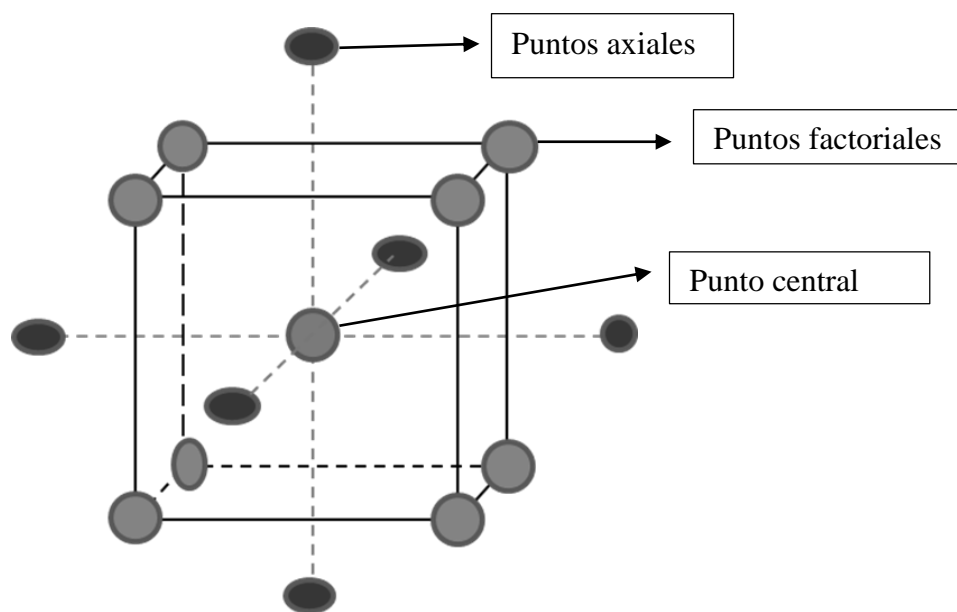
- Stagner J, Dias V. y Narayan R. 2012. Application and performance of maleated thermoplastics starch-poly blends for films. *Journal of applied polymer science* 126:135-142 p
- Torres Martínez, K. 2007. Optimización de la etapa de hidrólisis ácida en el proceso de fosfatación de almidón por extrusión para la encapsulación de aceite esencial y naranja. Tesis Ing. Química en Alimentos. Querétaro, México, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 40 p.
- Thompson, D. 1982. Response surface experimentation. *Journal of food process and preservation*, V.6, 155 p.
- Trejo, V., Aragón, N., Miranda, P. 2001. Estimación de la permeabilidad al vapor de agua en películas a base de quitosán. *Journal of the Mexixan Chemical Society*. V. 45. n. 1. 1-5 p.
- Vicentini, N. 2003. Elaboracao e caracterizacao de films comestiveis a base de fecula de mandioca ara uso en pos- colheita (Tese De Doutorado) Faculdade De Ciencias Agronomicas- Unesp, Botucatu- Sp.
- Wurzburg, O. B. 1986. Cross-linked starches. *Modified starches: properties and uses*. Boca Ratoon: CRC Press, p 41-53.
- Young, H. 1984. Fractionation of starch. In: Whistler, R. L., Bemiller, J. N., Paschall, E.F. *Starch chemistry and technology*. 2. ed. Orlando:Academic Press, p 249-283.
- Zhang, J., Mungara, P., Jane, J. 2001. Mechanical and thermal properties of extruded soy protein sheets. *Polymer*, 42, 2569-2578.
- Ziani, K., Oses, J., Coma, V., Mate, J. I. 2008. Effect of presence of glicerol and Tween 20 on the chemical and physical properties of films based on chITOSAN with different degree of deacetylation. *Food Science and Technology*, 41, 2159-2165.

7. ANEXOS

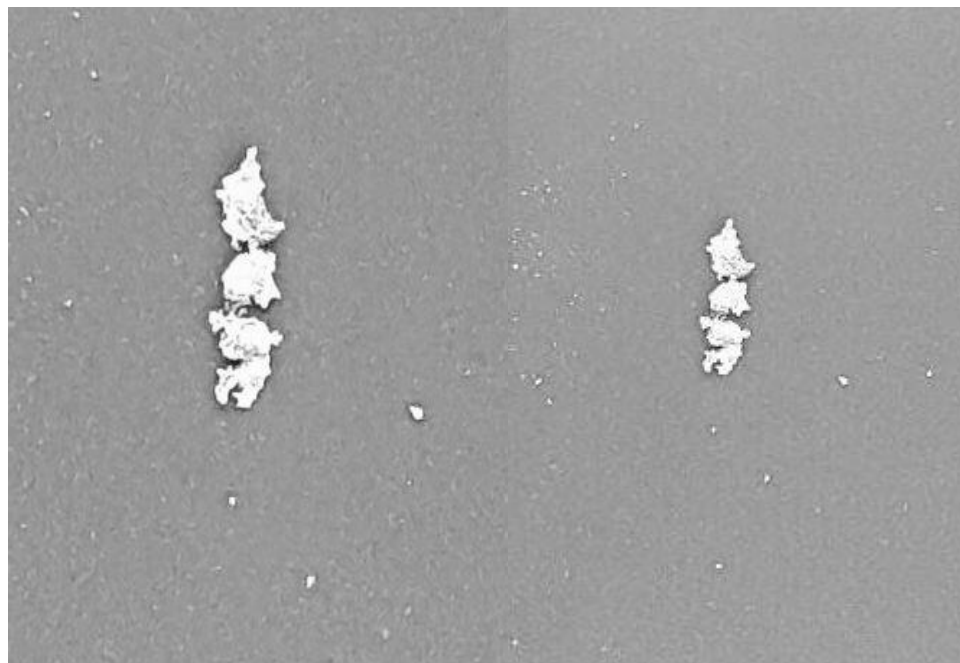
Anexo 1. Flujograma de obtención de harina de albedo de maracuyá



Anexo 2. Representación gráfica de la región experimental



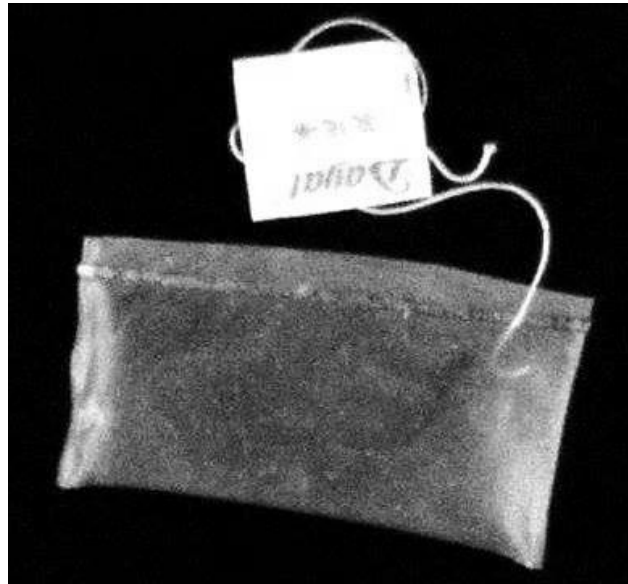
Anexo 3. Fotos del primer análisis de degradación a los 15 días



Anexo 4. Prototipo de bolsa del bioplásticos



Anexo 5. Prototipo de sobre de café instantáneo del bioplástico



Anexo 6. Evaluación de la solución filmogénica como recubrimiento en rodajas de plátano al día tres en condiciones ambientales

