

# Efecto del Aditivo Tween 80 y de la Temperatura de Procesamiento en las Propiedades Mecánicas de Tensión de Películas Flexibles Elaboradas a Partir de Almidón de Yuca Termoplástico

Karen L. Delgado\*, Giovanni A. Varona, Camilo E. Montilla y Héctor S. Villada

Grupo de investigación Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial (CYTBIA), Departamento de Agroindustria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia (e-mail: karendelgado@unicauca.edu.co).

\* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

*Recibido Feb. 8, 2016; Aceptado Mar. 29, 2016; Versión final May. 25, 2016, Publicado Dic. 2016*

---

## Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la temperatura de procesamiento y de la concentración del aditivo Tween 80 (un surfactante hidrofílico usado como aditivo alimentario) sobre las propiedades mecánicas de tensión de una película flexible elaborada a partir de almidón de yuca termoplástico (TPS), ácido poliláctico (PLA) y policaprolactona (PCL). Se realizó un diseño experimental para determinar el perfil de temperatura y concentración de Tween 80. Posteriormente se escogió el tratamiento con los resultados más sobresalientes en las propiedades mecánicas y se comparó con una película patrón (sin Tween 80). Los valores más sobresalientes de resistencia máxima a la tensión (6.13 MPa), elongación máxima (82.83%) y módulo de elasticidad (243.06 MPa) se obtuvieron con una concentración de 0.75% y temperatura de 137.35°C. Se concluye que la adición de Tween 80 no afectó significativamente los valores en las propiedades estudiadas de las películas flexibles.

*Palabras clave: almidón termoplástico (TPS), ácido poliláctico (PLA), policaprolactona (PCL), Tween 80, película flexible*

## Effect of the Additive Tween 80 and of the Process Temperature on the Mechanical Tensile Properties of Flexible Films Developed from Thermoplastic Cassava Starch

### Abstract

The aim of this research was to evaluate the effect of processing temperature and concentration of the additive Tween 80 on the mechanical tensile properties of a flexible film made of cassava thermoplastic starch (TPS), polylactic acid (PLA) and polycaprolactone (PCL). An experimental design was carried out to determine the temperature profile and Tween 80 concentration. Thereafter, treatment was chosen with the most outstanding results in mechanical properties and compared with a standard film (without Tween 80). The outstanding values of tensile strength (6.13 MPa), elongation (82.83%), and modulus of elasticity (243.06 MPa) were obtained with a concentration of 0.75% and temperature profile of 137.35 ° C. It is concluded that the addition of Tween 80 did not significantly affect the properties studied of the flexible films.

*Keywords: thermoplastic starch (TPS), polylactic acid (PLA), polycaprolactone (PCL), Tween 80, flexible film*

## INTRODUCCIÓN

El almidón es un biopolímero que proviene de fuentes renovables como cereales, seudocereales, raíces y tubérculos (Alarcón y Dufour, 1998), siendo considerado como uno de los candidatos más prometedores para el desarrollo de materiales biodegradables, debido a su combinación de atributos tales como bajo costo, disponibilidad, entre otros beneficios (Šimkovic, 2013). El almidón al ser mezclado con un plastificante y procesado bajo temperaturas específicas se puede convertir en un precursor termoplástico conocido como Almidón Termoplástico (TPS: Thermoplastic Starch – por sus siglas en inglés) (Li et al., 2011; Mo et al., 2011), este precursor puede fabricarse bajo diferentes concentraciones de plastificante lo cual incide en sus propiedades mecánicas, térmicas y de barrera (Mohammadi et al., 2013). El TPS presenta altas propiedades de barrera al oxígeno (Mahieu et al., 2014), es biodegradable (Šimkovic, 2013; Ren et al., 2009) y presenta una alta compostabilidad (Huneault y Li, 2012), pero desafortunadamente existen algunas limitaciones para el desarrollo de productos a base de almidón, ya que presenta bajas propiedades de resistencia a la tensión, estabilidad térmica y alta permeabilidad al vapor de agua debido a su naturaleza hidrófila y su consecuente inestabilidad a la humedad (Mohammadi et al., 2013; Schmidt et al., 2013) en comparación con los plásticos sintéticos convencionales.

La mezcla de TPS con otros polímeros es un método sencillo, rápido y de bajo costo para superar los inconvenientes anteriormente mencionados, no sólo con polímeros convencionales, sino también de base biológica y biodegradables (Mohammadi et al., 2013; Yokesahachart y Yoksan, 2010), por ejemplo el uso de ácido poli-láctico (PLA), policaprolactona (PCL) y TPS que fueron estudiados por Sarazin et al., (2008) y Mittal et al., (2015) reportando que este tipo de mezclas tiene gran ductilidad. No obstante, estas películas aún presentan algunas de las limitaciones ya mencionadas (Mina et al., 2013; Jalalvandi et al., 2013). Para disminuir estos problemas, los cuales afectan la estabilidad de las películas a base de almidón, diferentes autores han estudiado la adición de lípidos y tensoactivos (sustancias que constan con una fracción hidrofílica y otra hidrofóbica), encontrando que pueden actuar como barrera a la permeación de agua y presentan un alto carácter hidrófobo (Schmidt et al., 2013; Brandelero et al., 2012). El objetivo de este estudio fue caracterizar las películas obtenidas a partir de mezclas de TPS/PLA/PCL con adición Tween 80 y evaluar el efecto de la concentración de este tensoactivo sobre las propiedades mecánicas, térmicas por DSC y de absorción de agua.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó almidón de yuca de la variedad SM 707-17 en su estado nativo. La metodología se dividió en dos etapas; en la primera etapa se obtuvo almidón termoplástico (TPS) mediante la extrusión de almidón, un aditivo (Tween 80) y glicerol como plastificantes, paralelamente se procesó ácido poliláctico (PLA) y policaprolactona (PCL) en el extrusor para obtener la mezcla binaria. Posteriormente el TPS y la mezcla binaria fueron extruidos para obtener una mezcla ternaria (TPS-PLA-PCL), a la cual se le realizó un diseño experimental tuvo en cuenta como factores el perfil de temperatura (5) y la concentración del aditivo (3) y como variables de respuesta la resistencia máxima a la tensión, elongación máxima en el punto de rotura y el módulo de elasticidad. En la segunda etapa se eligió el tratamiento con los resultados sobresalientes en las propiedades mencionadas y se comparó con una película patrón (sin aditivo), en sus propiedades mecánicas (resistencia a la tensión), térmicas (calorimetría diferencial de barrido DSC) y absorción de agua.

### Efecto de la concentración del Tween 80 y perfil de temperatura

#### *Materiales.*

Almidón de yuca, suministrado por Amtex Colombia. Ácido poliláctico (Referencia 2002D) suministrado por Cargill Dow Polymers LLC (USA). Policaprolactona (PCL) suministrado por Perstorp UK Limited (Inglaterra) bajo la referencia CAPA 6800. Glicerol grado analítico (99.5% de pureza), provisto por DISAN S.A (Cali-Colombia), anhídrido maleico (99% de pureza, Merck). Tween 80 con referencia T164-500 marca Fisher Scientific, pureza de 99 %.

#### *Obtención del almidón termoplástico (TPS).*

Se secó almidón durante 24 horas en un horno marca Memmert, posteriormente se mezcló con glicerol en una relación 75:25 y el aditivo en una mezcladora de alta velocidad. La mezcla fue plastificada en un extrusor de tornillo simple marca ThermoScientific Haake Rheomex 19/25 OS, Alemania, con un diámetro de 19 mm, un tornillo con relación de compresión 5:1 y relación L/D de 25, se empleó un dado de cordón y una boquilla con 1mm de diámetro en su abertura, la concentración del aditivo se varió según se muestra en la tabla 1. En la Tabla 1 las *variables de respuesta* son el esfuerzo, la elongación y el módulo de Young

Tabla 1. Diseño experimental para la evaluación del efecto de la concentración de aditivo y del perfil de temperatura

<i>Tratamiento</i>	<i>Concentración de aditivo (%)</i>	<i>Perfil de temperatura</i>
T1P1	0,5	133.25
T1P2	0,5	135.50
T1P3	0,5	137.75
T1P4	0,5	140.00
T1P5	0,5	142.25
T2P1	0,75	133.25
T2P2	0,75	135.50
T2P3	0,75	137.75
T2P4	0,75	140.00
T2P5	0,75	142.25
T3P1	1	133.25
T3P2	1	135.50
T3P3	1	137.75
T3P4	1	140.00
T3P5	1	142.25

#### *Obtención de la mezcla binaria.*

Se realizó una segunda extrusión donde se mezclaron el ácido poliláctico (PLA), la policaprolactona (PCL) y el anhídrido maléico (AM), siguiendo el procedimiento descrito por Castañeda, (2012). Se empleó una mezcla de PLA/PCL a una relación 70/30, anhídrido maléico (2 % con respecto al peso de PLA/PCL), perfil de temperatura promedio de 152,5 °C, tornillo con una relación de compresión 5:1, relación L/D de 25, velocidad de tornillo de 30 rpm, dado de cordón y una boquilla con 1 mm de diámetro en su abertura.

#### *Obtención de películas flexibles a partir TPS, PLA, PCL y aditivos.*

Los pellets de TPS y mezcla binaria se mezclaron en una relación 75:25 y se procesaron en un extrusor de tornillo simple para obtener la película (mezcla ternaria), mediante las siguientes condiciones de proceso: tornillo con una relación de compresión 5:1, velocidad de tornillo 35 rpm y la temperatura de procesamiento se modificó según se presenta en la tabla 1. Se empleó un dado de soplado con boquilla anular de 23 mm, abertura 70 µm y un conjunto de rodillos para estandarizar el espesor de la película flexible.

#### *Propiedades mecánicas.*

Para estas mediciones se empleó una máquina universal de ensayos marca Shimadzu modelo EZ-L, Japón, siguiendo la norma ASTM D882-10, que establece el procedimiento para ejecutar la prueba de tensión en películas.

### **Efecto del Tween 80 en películas flexibles a partir de TPS, PLA y PCL**

Se evaluó la incidencia del Tween 80 en las películas, para ello se procesaron los materiales con las condiciones de proceso y formulación definidas en el diseño experimental anterior y una muestra patrón a la cual no se le incorporó aditivo. Las películas obtenidas fueron caracterizadas mediante la prueba mecánica de tensión, absorción de agua y calorimetría de barrido diferencial.

#### *Absorción de agua.*

Se realizó de acuerdo a la norma ASTM D570-98 (2010). Las muestras se cortaron de una dimensión de 76,2 mm de largo por 25,4 mm de ancho y se secaron a una temperatura de  $50 \pm 3$  °C durante 24 horas. Pasado este tiempo se les tomó el peso inicial en una balanza analítica y fueron sumergidas en agua destilada a  $23 \pm 1$  °C durante  $2 \pm 0,07$  horas, a continuación se retiró el exceso de humedad de la superficie y se registró su peso, luego se llevaron a secado nuevamente a una temperatura de  $50 \pm 3$  °C durante 24 horas y se pesaron. El porcentaje de material soluble se determinó por la relación entre el peso de inicial menos el final sobre el peso inicial. Esta prueba se realizó por triplicado para cada tratamiento.

#### *Comportamiento térmico por calorimetría de barrido diferencial.*

Se desarrolló según la norma ASTM D3418-08 empleando un calorímetro marca TA Instruments modelo Q20, USA. La muestra se depositó dentro de una cápsula de aluminio, se selló y se colocó dentro de la cámara térmica del DSC. Se realizaron dos ciclos de calentamiento desde -80 hasta 200 °C con el fin de

determinar la temperatura de fusión del TPS en el primero y la transición vítrea ( $T_g$ ), la temperatura de la señal de cristalización y la temperatura de fusión ( $T_m$ ) en el PLA y PCL en el segundo calentamiento. Este ensayo se efectuó como apoyo a la discusión de los resultados obtenidos en las otras pruebas.

### Análisis estadístico

Los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas de tensión y absorción de agua fueron analizados con el software estadístico SPSS versión 21, como primera medida se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, determinando que los resultados obedecen a una distribución normal, por tanto se realizó un análisis normal de varianza (ANOVA), usando la prueba de comparación múltiple de Tukey para muestras independientes, previo a ello, se estimó la igualdad de varianzas mediante el ensayo de Levene. Para la comparación del tratamiento escogido y la película patrón se realizó la comparación utilizando la T student. El valor de significancia empleado fue 0,05 y se usaron 5 muestras por tratamiento

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para mayor claridad se presentan y discuten los resultados en dos subsecciones: i) Efecto de la temperatura de proceso y concentración de Tween 80 en películas de TPS/PLA/PCL; y ii) Evaluación del efecto del Tween 80 en una película flexible de TPS/PLA/PCL

#### ***Efecto de la temperatura de proceso y concentración de Tween 80 en películas de TPS/PLA/PCL***

De acuerdo al análisis estadístico se comprobó que los resultados de las propiedades mecánicas de la película correspondían a una distribución normal y los factores estudiados (concentración de Tween 80 y temperatura de proceso) influyeron significativamente ( $p < 0,05$ ) sobre estas. La concentración del aditivo y la interacción Concentración\*Temperatura afectaron principalmente los resultados obtenidos de resistencia máxima a la tensión y el factor temperatura incidió en los resultados de elongación en el punto de rotura.

En la tabla 2 se puede observar que los tratamientos T2P1, T2P2, T2P4 y T2P3, fueron los de mayores valores en cuanto a resistencia máxima a la tensión. La mayor elongación en el punto de rotura la presentaron los tratamientos T2P3 y T2P5 y los valores sobresalientes de módulo de elasticidad fueron obtenidos por los tratamientos T2P4, T2P2, T2P1, T2P3 y T3P5. Por medio de la prueba de comparación múltiple de Tukey se estableció que ninguno de los tratamientos anteriormente nombrados para cada variable de respuesta tuvo diferencias significativas entre sí. En cuanto a la información de la tabla 2, se tiene que: \*Tratamiento; T1: película con 0,5% de Tween 80; T2: película con 0,75% de Tween 80; T3: película con 1% de Tween 80. P1, P2, P3, P4, P5, perfil de temperaturas 1, 2, 3, 4, 5, respectivamente y a,b,c,d,e,f y g Diferencias significativas entre las medias.

Tabla 2. Resultados de las variables de respuesta para las películas con Tween 80

Tratamiento	Perfil	Módulo de elasticidad (MPa)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Elongación máxima (%)
T1	P1	142.69 ± 3.07 <sup>a,b,c</sup>	4.10 ± 0.38 <sup>a,b,c,d</sup>	21.33 ± 0.67 <sup>a</sup>
	P2	170.80 ± 5.47 <sup>a,b,c,d</sup>	4.33 ± 0.12 <sup>a,b,c,d</sup>	22.95 ± 2.11 <sup>a,b</sup>
	P3	207.18 ± 9.50 <sup>c,d,e,f</sup>	4.93 ± 0.24 <sup>d</sup>	41.52 ± 3.40 <sup>c,d</sup>
	P4	180.73 ± 0.49 <sup>b,c,d,e</sup>	4.30 ± 0.22 <sup>a,b,c,d</sup>	28.29 ± 2.62 <sup>a,b,c</sup>
	P5	142.07 ± 0.33 <sup>a,b,c</sup>	3.96 ± 0.14 <sup>a,b,c</sup>	38.40 ± 2.05 <sup>b,c,d</sup>
T2	P1	256.02 ± 4.64 <sup>f,g</sup>	6.33 ± 0.58 <sup>e</sup>	40.31 ± 2.62 <sup>c,d</sup>
	P2	258.96 ± 8.00 <sup>f,g</sup>	6.21 ± 0.16 <sup>e</sup>	48.77 ± 2.58 <sup>d,e</sup>
	P3	243.06 ± 1.40 <sup>e,f,g</sup>	6.13 ± 0.20 <sup>e</sup>	82.83 ± 4.13 <sup>g</sup>
	P4	283.23 ± 0.87 <sup>g</sup>	6.19 ± 0.49 <sup>e</sup>	63.59 ± 4.37 <sup>e,f</sup>
	P5	151.49 ± 7.39 <sup>a,b,c,d</sup>	4.36 ± 0.54 <sup>b,c,d</sup>	66.53 ± 7.83 <sup>f,g</sup>
T3	P1	111.40 ± 3.30 <sup>a,b</sup>	3.44 ± 0.23 <sup>a</sup>	19.33 ± 1.02
	P2	126.86 ± 9.06 <sup>a,b</sup>	3.73 ± 0.12 <sup>a,b</sup>	20.69 ± 1.73 <sup>a</sup>
	P3	199.10 ± 7.03 <sup>c,d,e,f</sup>	4.78 ± 0.12 <sup>c,d</sup>	38.54 ± 4.72 <sup>a,b,c,d</sup>
	P4	108.39 ± 7.53 <sup>a</sup>	3.67 ± 0.22 <sup>a,b</sup>	26.54 ± 4.23 <sup>a,b,c</sup>
	P5	213.66 ± 7.03 <sup>d,e,f,g</sup>	4.75 ± 0.23 <sup>c,d</sup>	50.27 ± 0.57 <sup>d,e,f</sup>

En general se pudo evidenciar que los tratamientos se han visto afectados principalmente por la temperatura, al incrementar este factor se observó un aumento en la elongación máxima en el punto de rotura. Castañeda, (2012) afirma que este efecto también se ve influenciado por la cizalla que se presenta dentro del barril del extrusor causando que los componentes de la película se fundan fácilmente y las cadenas poliméricas se deslicen entre sí permitiendo una mayor orientación, otorgando una mayor elongación (Castañeda, 2012).

En este estudio, el efecto de la concentración del Tween 80 en las propiedades mecánicas de las películas obtenidas no presentó una tendencia definida con respecto al aumento en su concentración. Diversos autores indican que con el aumento de la concentración del aditivo, disminuye la resistencia máxima a la tensión y aumenta la elongación (Brandelero et al., 2012; Yokesahachart y Yoksan, 2011), este comportamiento se debe a un incremento en el volumen libre y movilidad de las cadenas, y a una disminución en las fuerzas intermoleculares (amilosa-amilosa) debido a que el Tween 80 actúa como plastificante y trabaja sinérgicamente con la glicerina. Según lo descrito anteriormente el tratamiento escogido para continuar con la investigación fue el T2P3 combinación que posiblemente formó una interacción entre el surfactante y la matriz polimérica (Chen et al., 2009) generando un aumento en la resistencia máxima a la tensión y en la elongación máxima.

### **Evaluación del efecto del Tween 80 en una película flexible de TPS/PLA/PCL**

Los resultados de las propiedades mecánicas y de absorción de agua de la película patrón (sin Tween 80) y de la adicionada con Tween 80, no presentaron diferencias significativas entre si de acuerdo a los resultados de la prueba t-student (El súper índice <sup>a</sup> hace referencia a que no existió diferencia significativa entre las medias). En la tabla 3 se observan los valores obtenidos en estas propiedades.

Tabla 3. Resultados de las propiedades mecánicas y absorción de agua de las películas flexibles

<i>Propiedades</i>	<i>Tween 80</i>	<i>Patrón</i>
Resistencia máxima a la tensión (MPa)	5.688 ± 0.117 <sup>a</sup>	5.824 ± 0.260 <sup>a</sup>
Elongación máxima (%)	59.119 ± 3.988 <sup>a</sup>	67.030 ± 4.545 <sup>a</sup>
Módulo de elasticidad (MPa)	224.131 ± 7.457 <sup>a</sup>	226.790 ± 20.620 <sup>a</sup>
Absorción de agua (%)	75.66 ± 6.88 <sup>a</sup>	85.42 ± 1.60 <sup>a</sup>
% Material Soluble perdido	30.95 ± 1.34 <sup>a</sup>	26.16 ± 0.96 <sup>a</sup>

Puede notarse que los menores valores en la resistencia máxima a la tensión, elongación máxima y módulo elástico fueron los reportados para las películas que contenían Tween 80. Según investigaciones realizadas por Rodríguez et al., (2006) este comportamiento es atribuido al efecto de plastificación del tensoactivo, lo cual aumenta el volumen libre entre las cadenas adyacentes de almidón generando una estructura más frágil (Rodríguez et al., 2006). De acuerdo con Chen et al., (2009), la reducción de la resistencia a la tensión de las películas con tensoactivo puede estar relacionado con las interacciones almidón-tensoactivo. Según ellos, los tensoactivos pueden formar complejos o interacciones con el almidón, causando una disminución de las interacciones de amilosa-amilosa, mientras que los grupos funcionales hidrófobos (grupos con alta masa molecular) del tensoactivo puede formar acumulaciones entre las cadenas de almidón, lo que dificulta la formación estructural de la película (Chen et al., 2009). Las propiedades mecánicas encontradas en la presente investigación son relevantes en comparación con lo hallado por diversos autores en películas a partir de TPS, como Carmona et al., (2015) que en películas de TPS, PLA y PCL obtuvieron resultados de resistencia a la tensión, elongación y módulo de elasticidad de 4,3 MPa, 4,4% y 260 MPa, respectivamente.

Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos de absorción de agua, dado que las películas que contenían Tween 80 registraron un menor valor en comparación con la película patrón, efecto que fue atribuido principalmente a la interacción de los grupos hidrofílicos del surfactante con los grupos hidroxilo del almidón y a la exposición de la fracción hidrófoba del Tween 80 la cual no permitió una matriz homogénea (Chen et al., 2009). Razón por la cual el porcentaje de material soluble en la película con aditivo fue menor al reportado por la muestra patrón. Dicho material soluble perdido, se puede deber a una posible pérdida de glicerina, compuesto hidrófilo que aumenta la sensibilidad al agua en la películas de almidón (Müller et al., 2008). Según Talja et al., 2008, colocar este tipo de películas por encima de una humedad de 60%, puede ocasionar interacciones almidón-agua y glicerol-agua, logrando un aumento en la cristalinidad de las películas y disminución en su elongación. Con la adición de Tween 80 a películas elaboradas a partir de TPS, se esperaba que disminuyera la absorción de agua de la película flexible tal como lo reportan Yokesahachart y Yoksan, (2010) y Brandelero et al., (2010) en sus investigaciones, tal como se comprobó en este estudio a pesar de no ser significativas las diferencias.

En cuanto al comportamiento térmico de las muestras (ver tabla 4 y figura 1b), se puede observar que el primer pico de fusión se presentó entre 57 °C y 60 °C, el cual fue asignado como la temperatura de fusión del PCL ( $T_{mPCL}$ ) (Carmona et al., 2015). El segundo pico de fusión fue registrado como la temperatura de fusión del PLA ( $T_{mPLA}$ ), que estuvo entre 151°C y 155 °C (Tsai et al., 2010) y el último pico de fusión que se registró entre 194 °C y 214 °C fue atribuido como la temperatura de fusión del TPS ( $T_{mTPS}$ ) (figura 1b). Adicionalmente, se presentó una señal de temperatura de cristalización ( $T_c$ ) que fue asignada para el PLA y oscila entre 109 °C y 115 °C.

Tabla 4. Transiciones de fase de la película flexible

Película	$T_{mPCL}$ (°C)	$\Delta H_{mPCL}$ (J/g)	$T_{cPLA}$ (°C)	$\Delta H_{cPLA}$ (J/g)	$T_{mPLA}$ (°C)	$\Delta H_{mPLA}$ (J/g)	$T_{mTPS}$ (°C)	$\Delta H_{mTPS}$ $T_m$ (J/g)
Patrón	59,26	1,51	111,47	2,41	154,90	3,55	205,95	77,48
Tween 80	57,35	1,78	104,58	3,27	151,19	4,17	194,79	72,56

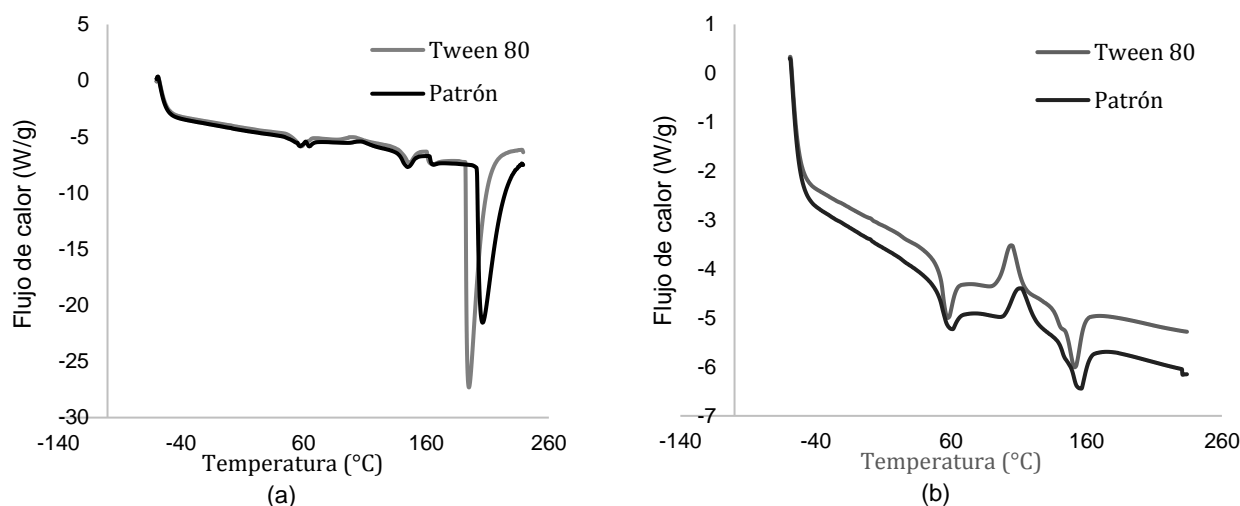


Fig. 1: Termogramas de la película con Tween 80 y patrón. a). Ciclo de calentamiento 1; b) Ciclo de calentamiento 2

En los resultados obtenidos se pudo observar que la entalpía y temperatura de fusión del TPS ( $\Delta H_{mTPS}$  y  $T_{mTPS}$ , respectivamente) para el tratamiento que contenía aditivo disminuyó con respecto a la muestra patrón, esto se puede deber a que el Tween 80 consigue interactuar con la amilosa y amilopectina, donde la presencia de un anfífilo produce una plastificación de las cadenas poliméricas provocando una pérdida de la disposición lineal de las moléculas, lo que podría generar menor temperatura de fusión (Jiménez et al., 2013) y menor estabilidad térmica. Este resultado concuerda con el estudio efectuado por Yokeshachart y Yoksan (2011), quienes evidenciaron un comportamiento similar en materiales a partir de TPS empleando diferentes sustancias anfífilas.

Se observó una disminución en las  $T_m$  del PLA y PCL, mientras sus respectivas entalpias incrementaron levemente con la adición del Tween 80, este comportamiento puede ser atribuido a que el aditivo actuaría sinérgicamente con la glicerina como plastificante, generando una pérdida en las fuerzas intermoleculares lo que produce mayor volumen libre y otorga mayor movilidad a las cadenas (Brandelero et al., 2012; Liu et al., 2009), incrementando la cristalinidad en el PLA y PCL (Javaldini et al., 2013; Carmona et al., 2015), lo cual estaría relacionado con el efecto nucleante del plastificante en estos polímeros (Teixeira et al., 2012). En cuanto a la  $T_{cPLA}$  se puede observar que fue mayor para el tratamiento sin aditivo lo que puede indicar un estructura cristalina más organizada de este componente (Carmona et al., 2015; Delpouve et al., 2014).

## CONCLUSIONES

Mediante el estudio se lograron definir las condiciones de procesamiento y formulación para la obtención de una película flexible a partir de almidón de yuca termoplástico, ácido poliláctico y policaprolactona adicionada con Tween 80, encontrando que la temperatura promedio de extrusión y la concentración del aditivo incidieron significativamente en las propiedades mecánicas de tensión, donde la temperatura afectó principalmente la elongación máxima en el punto de rotura. Adicionalmente, se logró evaluar el efecto del Tween 80 usando como patrón de comparación una película sin aditivo, estableciendo que no se presentaron diferencias significativas entre las películas en las pruebas estudiadas, sin embargo, se observó una disminución en las propiedades mecánicas y de absorción de agua, mientras que el ensayo de calorimetría de barrido diferencial indicó que la muestra con aditivo exhibe menor estabilidad térmica.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación-COLCIENCIAS por la financiación y a la Universidad del Cauca por el acompañamiento y apoyo en el desarrollo del proyecto.

## REFERENCIAS

Alarcón F. y Dufour D. "Almidón agrio de yuca en Colombia producción y recomendaciones Tomo 1: Producción y Recomendaciones". Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT): Cali, Colombia, 34-35, (1998)

ASTM D3418-82: "Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry, 1-4", West Conshohocken Pennsylvania Estados Unidos (2009)

ASTM D570 – 98 (Reapproved 2010). "Standard Test Method for Water Absorption of Plastics, 1-4", West Conshohocken Pennsylvania, Estados Unidos (2010)

ASTM D882 – 10. "Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, 1–10", West Conshohocken Pennsylvania, Estados Unidos (2010)

Brandelero, R.P.H., Grossmann, M.V. y Yamashita, F. "Films of starch and poly (butylene adipate co-terephthalate) added of soybean oil (SO) and Tween 80", Carbohydrate polymers: 90(4), 1452-1460 (2012)

Carmona, V.B., Corrêa, A.C., Marconcini, J.M. y Mattoso, L.H.C. "Properties of a Biodegradable Ternary Blend of Thermoplastic Starch (TPS), Poly ( $\epsilon$ -Caprolactone)(PCL) and Poly (Lactic Acid)(PLA)", Journal of Polymers and the Environment, 23(1): 83-89 (2015)

Castañeda, J. "Estudio de la retrogradación en películas flexibles obtenidas a partir de mezclas de almidón nativo de yuca, ácido poli-láctico (PLA) y policaprolactona (PCL)", Tesis de grado Magíster, Universidad del Valle, Facultad de ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales (2012)

Chen, C.H., Kuo, W.S. y Lai, L.S. "Effect of surfactants on water barrier and physical properties of tapioca starch/decolorized hsian-tsao leaf gum films", Food Hydrocolloids: 23(3), 714-721 (2009)

Delpouve, N., Arnoult, M., Saiter, A., Dargent, E. y Saiter, J. M. "Evidence of two mobile amorphous phases in semicrystalline polylactide observed from calorimetric investigations", Polymer Engineering y Science: 54(5), 1144-1150 (2014)

Huneault, M.A. y Li, H. "Preparation and properties of extruded thermoplastic starch/polymer blends", Journal of Applied Polymer Science: 126(S1), 96-108 (2012)

Jalalvandi, E., Ghanbari, T., Cherghibidsorkhi, H., Zeimaran, E., y Ilbeygi, H. "Processing, Thermal Behavior and Tensile Properties of PLA/Thermoplastic Starch/Montmorillonite Nanocomposites". Advanced Materials Research: 68(4), 75-79 (2013)

Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., y Chiralt, A. (2013). "Phase transitions in starch based films containing fatty acids. Effect on water sorption and mechanical behaviour", Food Hydrocolloids: 30(1), 408-418 (2013)

Li, M., Liu, P., Zou, W., Yu, L., Xie, F., Pu, H. y Chen, L. "Extrusion processing and characterization of edible starch films with different amylose contents", Journal of Food Engineering: 106(1), 95-101 (2011)

Liu, H., Xie, F., Yu, L., Chen, L., y Li, L. "Thermal processing of starch-based polymers", Progress in Polymer Science: 34(12), 1348-1368 (2009)

Mahieu, A., Terrié, C., y Youssef, B. "Thermoplastic starch films and thermoplastic starch/polycaprolactone blends with oxygen scavenging properties: Influence of water content", *Industrial Crops and Products*: 72(1), 192-199 (2014)

Mina, J.H., Valadez-González, A., Herrera-Franco, P., Zuluaga, F. y Delvasto, S. "Preparación y caracterización físico-química y mecánica de mezclas ternarias de polilactida (PLLA), policaprolactona (PCL) y almidón termoplástico (TPS)", *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*: 33(1), 82-91 (2013)

Mittal, V., Akhtar, T. y Matsko, N. "Mechanical, Thermal, Rheological and Morphological Properties of Binary and Ternary Blends of PLA, TPS and PCL", *Macromolecular Materials and Engineering*: 300(4), 423-435 (2015)

Mo, X.Z., Zhong, Y.X., Pang, J.Y., Guo, T. y Qi, X. "Experimental Investigation of the Thermoplastic Tapioca Starch/Sisal Fiber Composites". In *Advanced Materials Research*: 221, 586-591 (2011)

Mohammadi N.A., Moradpour, M., Saeidi, M. y Alias, A.K. "Thermoplastic starches: Properties, challenges, and prospects", *Starch - Stärke*: 65(1 - 2), 61-72 (2013)

Müller C., Yamashita F. y Laurindo J.B. "Evaluation of the effects of glycerol and sorbitol concentration and water activity on the water barrier properties of cassava starch films through a solubility approach", *Carbohydrate Polymers*: 72(1), 82-87, (2008)

Ren, J., Fu, H., Ren, T. y Yuan, W. "Preparation, characterization and properties of binary and ternary blends with thermoplastic starch, poly (lactic acid) and poly (butylene adipate-co-terephthalate)", *Carbohydrate polymers*: 77(3), 576-582 (2009)

Rodríguez, M., Osés, J., Ziani, K. y Maté, J. I. "Combined effect of plasticizers and surfactants on the physical properties of starch based edible films", *Food Research International*: 39, 840–846 (2006)

Sarazin, P., Li, G., Orts, W. J., & Favis, B. D. "Binary and ternary blends of polylactide, polycaprolactone and thermoplastic starch", *Polymer*: 49(2), 599-609 (2008)

Schmidt, V.C.R., Porto, L.M., Laurindo, J.B. y Menegalli, F.C. "Water vapor barrier and mechanical properties of starch films containing stearic acid", *Industrial Crops and Products*: 41, 227-234 (2013)

Šimkovic, I. "Unexplored possibilities of all-polysaccharide composites", *Carbohydrate polymers*: 95(2), 697-715 (2013)

Talja R., Helén H., Roos Y.H. y Jouppila K. "Effect of type and content of binary polyol mixtures on physical and mechanical properties of starch-based edible films", *Carbohydrate Polymers*: 71(2), 269-276, (2008)

Teixeira, E.D.M., Curvelo, A. A., Corrêa, A.C., Marconcini, J. M., Glenn, G. M. y Mattoso, L. H. "Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid)", *Industrial Crops and Products*: 37(1), 61-68 (2012)

Tsai, C.C., Wu, R.J., Cheng, H.Y., Li, S.C., Siao, Y.Y., Kong, D.C., y Jang, G.W. "Crystallinity and dimensional stability of biaxial oriented poly (lactic acid) films", *Polymer Degradation and Stability*: 95(8), 1292-1298 (2010)

Yokesahachart, C., y Yoksan, R. "Effect of amphiphilic molecules on characteristics and tensile properties of thermoplastic starch and its blends with poly (lactic acid)", *Carbohydrate Polymers*: 83(1), 22-31 (2011)