

## **TABLA DE CONTENIDO**

Pág.

**RESUMEN** 16

**ABSTRACT** 17

**INTRODUCCIÓN** 18

**1. OBJETIVOS** 21

1.1 Objetivo General 21

1.2 Objetivos Específicos 21

**2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE** 22

2.1 ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO (TPS) 23

2.1.1 Generalidades 23

2.1.2 Glicerol como plastificante del almidón termoplástico (TPS) 25

2.1.3 Preparación del almidón termoplástico (TPS) 28

2.2 MEZCLAS BIODEGRADABLES BASADAS EN ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO 30

2.2.1 Ácido poliláctico 31

2.2.2 Mezclas de almidón termoplástico (TPS) con ácido poliláctico (PLA) 33

2.2.3 Policaprolactona 37

2.2.4 Mezclas de almidón termoplástico (TPS) con Policaprolactona (PCL) 38

2.2.5 Mezclas ternarias TPS-PLA-PCL 39

2.3 FIBRAS NATURALES USADAS EN MATERIALES COMPUESTOS 40

2.3.1 Fibras de fique 43

2.4 MATERIALES COMPUESTOS 47

2.4.1 Generalidades 47

2.4.1.1 Definición 47

2.4.1.2 Región interfacial en materiales compuestos reforzados con fibras 48

2.4.1.3 Modelos de predicción de propiedades mecánicas en materiales compuestos 52

2.4.2 Almidón termoplástico reforzado con fibras naturales 55

2.4.3 Ácido poliláctico reforzado con fibras naturales 57

2.4.4 Policaprolactona reforzada con fibras naturales 58

**3. MATERIALES Y MÉTODOS** 61

3.1 MATERIALES 61

3.1.1 Almidón de yuca (*Manihot sculenta crantz*) 61

3.1.1.1 Almidón natural de yuca 61

3.1.1.2 Almidón acetilado de yuca 61

3.1.2 Glicerol 62

3.1.3 Fibras de fique 62

3.1.4 Ácido poliláctico (PLA) 62

3.1.5 Policaprolactona (PCL) 62

3.2 PREPARACIÓN DEL ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO (TPS) 63

3.3 PREPARACIÓN DE LA MATRIZ TPS-PLA-PCL 64

3.4 TRATAMIENTO DE ALCALINIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE FIQUE 65

3.5 PREPARACIÓN DEL MATERIAL COMPUUESTO 66

### **3.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL 67**

#### **3.6.1 Caracterización Físico-química 67**

##### **3.6.1.1 Espectroscopia Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)**

67

##### **3.6.1.2 Absorción de humedad 67**

##### **3.6.1.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM) 68**

##### **3.6.1.4 Microscopía óptica 69**

##### **3.6.1.5 Difracción de Rayos X (DRX) 69**

#### **3.6.2 Caracterización Térmica 70**

##### **3.6.2.1 Análisis Termogravimétrico (TGA) 70**

##### **3.6.2.2 Análisis Mecánico-dinámico (DMA) 70**

#### **3.6.3 Caracterización Mecánica 70**

##### **3.6.3.1 Ensayo de Tensión 70**

##### **3.6.3.2 Ensayo de Zafado de una fibra (*pull-out*) 72**

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 74**

### **4.1 OBTENCIÓN DE ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO (TPS) NATURAL Y ACETILADO 74**

#### **4.1.1 Caracterización Físico-química 74**

##### **4.1.1.1 Espectroscopia Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) 74**

##### **4.1.1.2 Absorción de Humedad 79**

##### **4.1.1.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM) 81**

##### **4.1.1.4 Difracción de rayos X (DRX) 82**

#### **4.1.2 Caracterización Térmica 84**

##### **4.1.2.1 Análisis termogravimétrico (TGA) 84**

##### **4.1.2.2 Análisis dinámico mecánico (DMA) 88**

#### **4.1.3 Caracterización Mecánica (ensayo de tensión) 90**

### **4.2 CARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO DE MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DE LAS FIBRAS DE FIQUE 91**

#### **4.2.1 Caracterización mecánica de las Fibras de Fique 91**

#### **4.2.2 Caracterización física de las fibras de fique 96**

##### **4.2.2.1 Espectroscopia Infrarrojo (FTIR) de las fibras de fique 96**

##### **4.2.2.2 Absorción de humedad de las fibras de fique 98**

### **4.3 ANÁLISIS MICROMECÁNICO DE LOS TPS (NATURALES Y ACETILADOS) CON LAS FIBRAS DE FIQUE (NATURALES Y ALCALINIZADAS) 99**

### **4.4 PREPARACIÓN DE LA MATRIZ BIODEGRADABLE A PARTIR DE LA MEZCLA TERNARIA DE ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO (TPS) CON ACIDO POLILÁCTICO (PLA) Y POLICAPROLACTONA (PCL) 105**

#### **4.4.1 Caracterización Físico-química 105**

##### **4.4.1.1 Espectroscopia Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) 105**

##### **4.4.1.2 Absorción de humedad 107**

##### **4.4.1.3 Microscopía electrónica de barrido 109**

##### **4.4.2 Caracterización Térmica (análisis termogravimétrico - TGA) 111**

##### **4.4.3 Caracterización mecánica (ensayo de tensión) 115**

#### **4.5 Preparación y caracterización de un material compuesto biodegradable de PLA-PCL-TPS reforzado con fibras de fique 120**

4.5.1 Caracterización micro-mecánica 120

4.5.2 Caracterización mecánica (ensayo de tensión) 126

**5. CONCLUSIONES 134**

**6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 137**

**7. ANEXOS 152**

7.1. CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA  
PARA EL ALMIDÓN DE YUCA NATURAL 152

7.2. CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA  
PARA EL ALMIDÓN DE YUCA ACETILADO 152

7.3. PROPIEDADES DEL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) 153

7.4. PROPIEDADES DE LA POLICAPROLACTONA (PCL) 156

7.5. PROPIEDADES DEL GLICEROL 159

7.6. SUPERFICIES DE RUPTURA EN MATERIALES  
COMPUESTOS 160

7.7. GRÁFICAS DE MICRO-MECÁNICA ENTRE FIBRAS DE FIQUE  
(NATURALES Y ALCALINIZADAS), PLA Y PCL 161